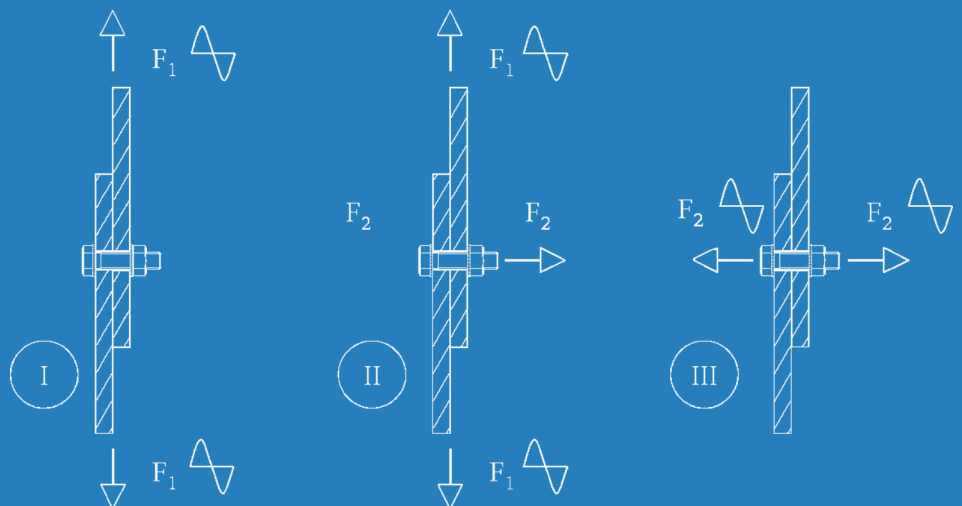


## 2/2010 Forschungsbericht

Untersuchung des Einflusses konstruktiver Maßnahmen bezüglich der Sicherungseigenschaften gegen Lockern und Losdrehen von planmäßig vorgespannten HV-Schraubenverbindungen unter zyklischer Beanspruchung



ISBN 978-3-941687-11-0

## Copyright-Klausel mit Haftungsbegrenzung

© Copyright - Klausel

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstr. 65, D 40237 Düsseldorf). Dies gilt auch für die fotomechanische Wiedergabe und die Speicherung auf elektronischen Medien. Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den DASt gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe im Einzelfall zu vereinbaren ist. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Nachspeicherung und Auswertung von Datenverarbeitungsunterlagen, bleiben auch bei Verwendung von Teilen des Werkes dem DASt vorbehalten.

Bei der Zusammenstellung aller Texte und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren, der Verlag und der Herausgeber können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge ist der Herausgeber stets dankbar.

Herausgeber:  
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt,  
Düsseldorf

Vertrieb:  
Stahlbau Verlags- und Service GmbH,  
Düsseldorf

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**2/2010**

**Forschungsbericht**

**Untersuchung des Einflusses  
konstruktiver Maßnahmen be-  
züglich der Sicherungseigen-  
schaften gegen Lockern und  
Losdrehen von planmäßig vor-  
gespannten HV-Schraubenver-  
bindungen unter zyklischer Be-  
anspruchung**

**Technische Universität Darmstadt  
Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik**

**Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange  
Dipl.-Ing. Roland Friede**

**Stahlbau Verlags- und Service GmbH**



**Forschungsvereinigung**      **Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V.  
DAST**

**Forschungsstelle**              **Technische Universität Darmstadt  
Institut für Stahlbau und Werkstoff-  
mechanik**

**IGF-Nummer**                      **15918N**

**DAST-Homepage**              **[www.stahlbauforschung.de](http://www.stahlbauforschung.de)**



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

<b><u>1</u></b>	<b><u>EINLEITUNG</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	FORSCHUNGSZIEL	1
1.2	AUFBAU DES FORSCHUNGSBERICHTES	2
<b><u>2</u></b>	<b><u>STAND DER FORSCHUNG</u></b>	<b><u>3</u></b>
2.1	AUSGANGSSITUATION	3
2.2	LOSDREHEN	4
2.2.1	LOSDREHVERSUCHE	4
2.2.2	MECHANISMUS DES LOSDREHENS	6
2.3	LOCKERN	8
2.4	REIBUNG	9
2.4.1	GLEITFUGEN	9
2.4.2	COULOMBSCHE REIBUNGSGESETZ	10
2.4.3	ADHÄSION	10
<b><u>3</u></b>	<b><u>VERSUCHSPROGRAMM</u></b>	<b><u>11</u></b>
3.1	SCHEMATISCHER VERSUCHSAUFBAU	11
3.2	MATERIAL	13
3.2.1	SCHRAUBEN	13
3.2.2	BLECHE	13
3.3	MESSUNGEN	14
3.4	MESSEN DER SCHRAUBENKRAFT	14
3.4.1	PRÄPARIEREN DER SCHRAUBEN	14
3.4.2	KALIBRIEREN DER SCHRAUBEN	14
3.4.3	GENAUIGKEIT DER SCHRAUBENMESSUNG	15
3.5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	16
3.5.1	LAST-VERFORMUNGSKURVE	16
3.5.2	ALLGEMEIN	16
3.5.3	ZUGEinFLUSS (REIHE 13-17)	18
3.5.4	ZYKLISCHE ZUGBELASTUNG (REIHE 18-19)	19
<b><u>4</u></b>	<b><u>VERSUCHSERGEBNISSE</u></b>	<b><u>20</u></b>
4.1	LAST-VERFORMUNGS-KURVEN	20
4.2	ERGEBNISSE DER LOSDREHVERSUCHE	21

4.2.1	KLEMLÄNGENEINFLUSS .....	22
4.2.2	EINFLUSS DER BESCHICHTUNG .....	23
4.2.3	EINFLUSS EINER ÄÜßEREN ZUGKRAFT .....	24
4.2.4	ZYKLISCHER ZUGVERSUCH.....	25
4.2.5	EINFLUSS DER SCHRAUBENGRÖßE .....	26
4.2.6	EINFLUSS DER FESTIGKEITSKLASSE.....	27
4.2.7	EINFLUSS DES VERSCHIEBEWEGES .....	28
4.2.8	EINFLUSS DER VORSPANNUNG MIT DEM KOMBINIERTEN VERFAHREN .....	29
4.2.9	EINFLUSS DES SICHERUNGSELEMENTES NORD-LOCK.....	30
4.2.10	EINFLUSS VON FUTTERBLECHEN .....	31
<b>4.3</b>	<b>SELBSTTÄTIGES LOSDREHEN UND SETZEN.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>VORSPANNKRÄFTE NACH DEM ANZIEHEN.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b><u>INTERPRETATION DER ERGEBNISSE .....</u></b>	<b><u>37</u></b>
<b>5.1</b>	<b>EINFLUSS DER UNTERSUCHTEN PARAMETER .....</b>	<b>37</b>
5.1.1	KLEMLÄNGENEINFLUSS .....	37
5.1.2	EINFLUSS DER BESCHICHTUNG .....	38
5.1.3	EINFLUSS EINER ÄÜßEREN ZUGKRAFT .....	38
5.1.4	ZYKLISCHER ZUGVERSUCH.....	38
5.1.5	EINFLUSS DER SCHRAUBENGRÖßE .....	38
5.1.6	EINFLUSS DER FESTIGKEITSKLASSE.....	39
5.1.7	EINFLUSS DES VERSCHIEBEWEGES .....	39
5.1.8	EINFLUSS DER VORSPANNUNG MIT DEM KOMBINIERTEN VERFAHREN .....	39
5.1.9	EINFLUSS DES SICHERUNGSELEMENTES NORD-LOCK.....	39
5.1.10	EINFLUSS VON FUTTERBLECHEN .....	40
<b>5.2</b>	<b>SETZVERLUSTE .....</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>GRENZGLEITUNG.....</b>	<b>41</b>
<b>5.4</b>	<b>VORSPANNKRÄFTE NACH DEM ANZIEHEN.....</b>	<b>43</b>
<b>5.5</b>	<b>ÜBERTRAGBARKEIT DER VERSUCHSERGEBNISSE AUF ANDERE PARAMETER .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b><u>ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF.....</u></b>	<b><u>44</u></b>
<b>6.1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>44</b>
<b>6.2</b>	<b>FORSCHUNGSBEDARF .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u></b>	<b><u>47</u></b>

---

# 1 Einleitung

---

Der vorliegende Forschungsbericht ist Ergebnis des AiF-Forschungsvorhabens „Sichern von Schraubenverbindungen“. Durchgeführt wurde das Projekt am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik am Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt. Das Forschungsvorhaben war für die Zeit vom 01.12.2008 bis zum 31.05.2010 ausgelegt. Das Forschungsvorhaben wurde innerhalb der geplanten Zeit erfolgreich abgeschlossen. Es sind alle Projektziele erreicht worden.

Das Forschungsvorhaben 15918 N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Die durchführende Forschungsstelle dankt der AiF und dem projektbegleitenden Ausschuss für finanzielle Förderung und Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens.

## 1.1 Forschungsziel

Ziel war es, auf der Grundlage von Versuchen an zyklisch- querbeanspruchten, planmäßig vorgespannten Einschraubenverbindungen, Kenntnisse über deren Setzungs- und Losdrehverhalten zu gewinnen.

Bei den Versuchen werden folgende Parameter variiert:

- Klemmlänge (40 - 120 mm)
- Beschichtung (unbeschichtet – dünne Epoxydharzbeschichtung)
- Festigkeitsklasse (8.8 und 10.9)
- Zusätzliche Belastung in Schraubenlängsrichtung
- Unterschiedliche Verschiebewege (0,3; 0,5; 1,0 und 2,0 mm)
- Verwendung des Sicherungselementes NORD-LOCK
- Verwendung von Futterblechen.

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 1 (Seite 12) dargestellt.

Mit der Versuchsreihe werden die Einflüsse der maßgebenden Parameter für das Losdrehverhalten der Schraubenverbindungen untersucht. Auf der Basis der Versuchsergebnisse werden die weiteren Punkte und offenen Fragen bearbeitet:

- Wie hängen die Bewegungen in den Gleitebenen mit dem Mechanismus des Losdrehens zusammen?
- Können neue Aussagen über die Grenzverschiebung getroffen werden?
- In welchem Maße lässt sich das Losdrehverhalten zyklisch beanspruchter Schraubenverbindungen durch Vergrößerung der Klemmlängen günstig beeinflussen?

- 
- Welchen Einfluss hat die Beschichtung der Bauteile auf die Schraubenvorspannkraft und damit auf die Selbsthemmung der Schraubenverbindung gegen Lockern?
  - Spielt der Schraubendurchmesser für das Losdrehverhalten der Schraubenverbindung eine Rolle?
  - Inwieweit nimmt die Zugkraftbeanspruchung der Schraubenverbindung Einfluss auf das Losdrehverhalten?
  - Erstellung von Konstruktionsregeln, welche die maßgebenden Parameter berücksichtigen und dem Anwender als Konstruktionshilfe dienen.
  - In welcher Richtung besteht weiterer Forschungsbedarf? Welche alternativen Sicherungsmittel sind denkbar?

Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Konstruktionsregeln abgeleitet. Dadurch wird dem Planer ein Hilfsmittel an die Hand gegeben, mit dem gefährdete Verbindungen identifiziert und sicher konstruiert werden können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Verbindungen im bestehenden Bauwerk nachzubessern.

Als Anwendungsbeispiel seien hier exemplarisch Verbindungen in Kranbahnen und Kranhallen sowie Anschlüsse im Mast- und Brückenbau genannt.

## **1.2 Aufbau des Forschungsberichtes**

In der Einleitung werden die Ziele und Vorgehensweisen erläutert sowie ein Überblick über den Forschungsbericht gegeben. Im zweiten Kapitel wird der bisherige Stand der Forschung dargestellt. Im Kapitel drei werden die durchgeführten Versuche vorgestellt und die Ergebnisse präsentiert. Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse interpretiert. Im abschließenden Kapitel fünf werden die Ergebnisse zusammengefasst, ausstehender Forschungsbedarf identifiziert und es wird ein Fazit gezogen.

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in den Anhängen A und B aufgeführt. Dabei wird unterschieden:

- Anhang A: Verläufe der Vorspannkraft
- Anhang B: Verschiebungen in den jeweiligen Gleitebenen

Anhang C zeigt die Systemskizzen der Versuche.

---

## 2 Stand der Forschung

---

### 2.1 Ausgangssituation

Durch Schraubensicherungen soll das Lockern und Losdrehen von planmäßig vorgespannten Schraubenverbindungen und dadurch die Reduktion der eingepprägten Vorspannkraft verhindert werden. Neuere Erkenntnisse über die mangelnde Wirkung und häufig beobachtete Fehlanwendungen von Schraubensicherungen wie Federringe, Federscheiben, Fächerscheiben, Zahnscheiben, Sicherungsbleche, Sicherungsnapfe und Sicherungsmuttern veranlassten das Deutsche Institut für Normung e.V., im Jahr 2003 sämtliche Normen der betreffenden Schraubensicherungen zurückzuziehen [6]. Seither werden die vorwiegend aus dem Maschinen- und Anlagenbau stammenden Schraubensicherungen im Stahlbau ausschließlich als zusätzliche konstruktive Maßnahmen eingesetzt. Allerdings ist die Verwendung dieser Sicherungselemente normativ nicht abgesichert.

In der Norm DIN 18800-7 [3] wird eine Sicherung der Schrauben gegen Lösen und Losdrehen gefordert. Aus Ermangelung normativ erfasster Sicherungselemente, stehen derzeit keine zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen zur Verfügung. In [3] wird außerdem die Möglichkeit der Sicherung durch planmäßiges Vorspannen erwähnt. Nach heutigem Wissensstand, ist diese Maßnahme jedoch nicht hinreichend.

Bei der praktischen Anwendung entsteht dadurch ein hoher Grad an Unsicherheit, was zu Fehlanwendung von Sicherungselementen und einem überproportional großen Wartungsaufwand führen kann.

Eine planmäßige Vorspannkraft in Schraubenverbindungen ist in vielen Fällen erforderlich. Insbesondere bei zyklisch beanspruchten Verbindungen wird durch die Vorspannung die Einwirkung auf die Schraube und damit die Gefahr des Ermüdungsbruchs reduziert. Lockern und Losdrehen führen dazu, dass die bei der Montage eingepprägte Vorspannkraft reduziert wird. Die beiden Effekte werden im Folgenden näher erläutert.

## 2.2 Losdrehen

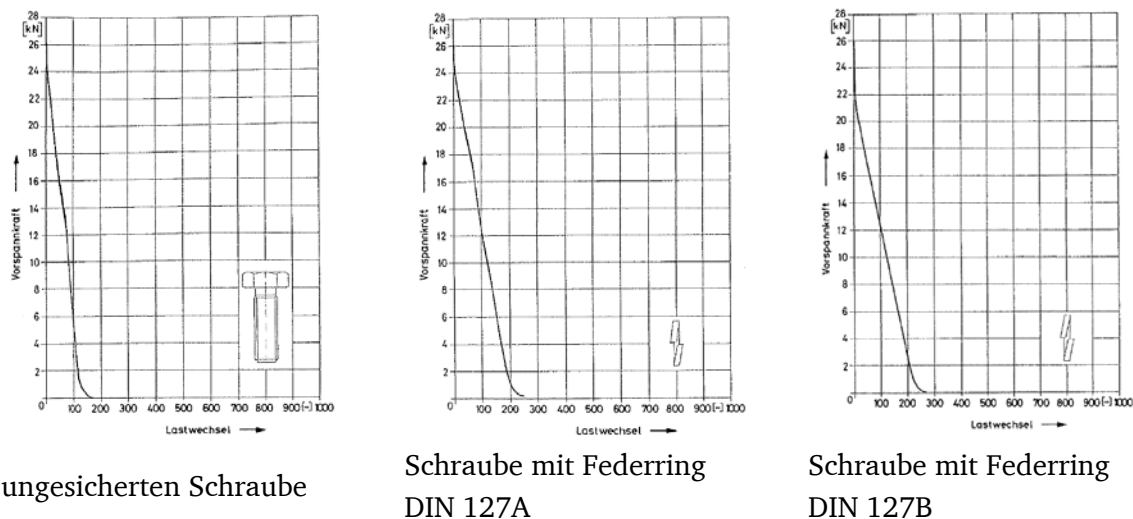
Beim selbsttätigen Losdrehen werden zwei Fälle mit unterschiedlicher Belastungsrichtung unterschieden:

- zyklische Belastung in Schraubenlängsachse und
- zyklische Belastung quer zur Schraubenachse.

Der erste Fall spielt eine eher untergeordnete Rolle, da die für das Losdrehen erforderliche Belastung deutlich größer als die Dauerfestigkeit ist [14]. Bei Belastung quer zur Schraubenachse können jedoch bereits relativ geringe Lasten zum Gleiten in den Trennfugen und damit zum Losdrehen führen. Losdrehen unter Querbelastung wird im Weiteren beschrieben.

### 2.2.1 Losdrehversuche

Für eine vergleichende Bewertung von Losdrehsicherungen wird in der Regel ein Prüfstand verwendet, der auf den von Junker und Strelow entwickelten Rüttelversuch zurückgeht [7]. Bei diesem Prüfstand wird die vorgespannte Schraube senkrecht zu ihrer Achse durch eine Mischung aus Kraft und Verschiebung beansprucht. Die Restvorspannkraft wird kontinuierlich über die Lastwechselzahl gemessen. In Bild 1 sind Ergebnisse von Losdrehversuchen von Schrauben der Größe M10 mit verschiedenen Sicherungselementen dargestellt. Verglichen werden die verschiedenen Sicherungselemente mit einer ungesicherten Schraube. Man erkennt deutlich den rapiden Abfall der Vorspannkraft in der Schraube bei ungeeigneten Sicherungselementen. Der Vergleich mit einer ungesicherten Schraube zeigt die mangelnde Wirkung der Sicherungselemente. Einzig der Formschluss durch Verkleben oder der Einsatz von Schrauben mit Verriegelungszähnen stellt eine wirkungsvolle Sicherung gegen Losdrehen dar. Diese Erkenntnis wird auch in neueren Untersuchungen bestätigt [5].

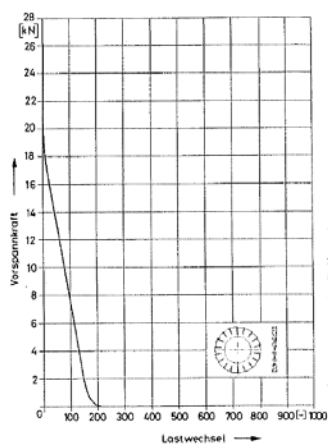


ungesicherten Schraube

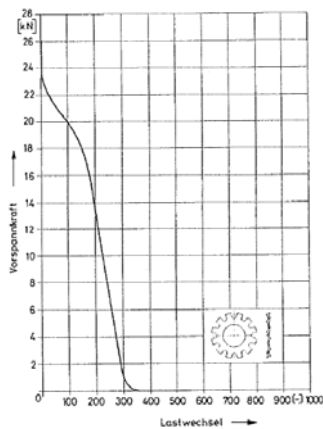
Schraube mit Federring  
DIN 127A

Schraube mit Federring  
DIN 127B

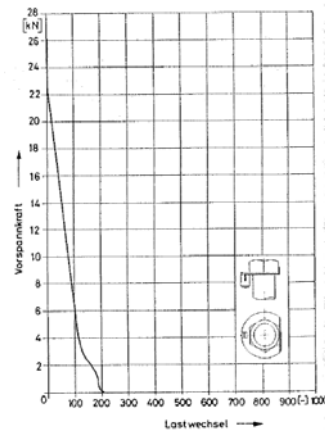
**Bild 1a: Losdrehverhalten von Schrauben mit und ohne Sicherungselemente [2]**



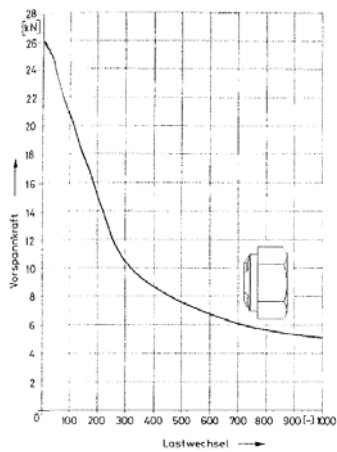
Schraube mit Fächerscheibe  
DIN 6798 A



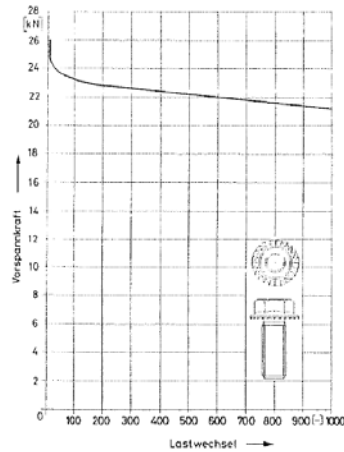
Schraube mit Zahnscheibe  
DIN 6797 A



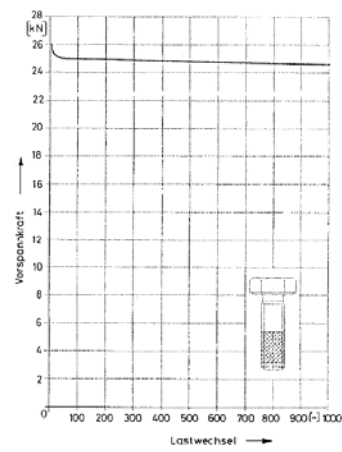
Schraube mit Außennase  
DIN 432



Mutter mit Klemmteil  
DIN 980



Schraube mit Verriegelungs-  
zähnen



im Gewinde verklebte  
Schraube

**Bild 1b: Losdrehverhalten von Schrauben mit und ohne Sicherungselemente [2]**

Die hier vorgestellte Versuchsdurchführung ist in DIN 65151 „Dynamische Prüfung des Sicherungsverhaltens von Schraubenverbindungen“ geregelt [4]. Allerdings wird explizit darauf hingewiesen, dass keine absoluten Aussagen getroffen werden können, sondern nur eine vergleichende Aussage möglich ist. In aktuellen Veröffentlichungen wird daher immer wieder die Forderung nach einer objektiven Prüfmöglichkeit gestellt (z.B. [5] und [9]).

## 2.2.2 Mechanismus des Losdrehens

Das Anziehdrehmoment  $M_A$  beim Vorspannen setzt sich aus Anteilen im Gewinde (Steigungsmoment  $M_{GSt}$  und Reibung  $M_{GR}$ ) und in der Kopfauflage (Reibung  $M_K$ ) zusammen.

Das Anziehdrehmoment errechnet sich nach [2] aus:

$$M_A = M_{GSt} + M_{GR} + M_K$$

$$M_{GSt}: \text{ Steigungsmoment im Gewinde} \quad M_{GSt} = F_V \frac{d_2}{2} * \tan \varphi$$

$$M_{GR}: \text{ Reibung im Gewinde} \quad M_{GR} = F_V \frac{d_2}{2} * \tan \rho_G$$

$$M_K: \text{ Reibung in der Kopfauflage} \quad M_K = F_V \frac{D_{KM}}{2} * \tan \rho_K$$

mit  $F_V$ : Vorspannkraft

$d_2$ : Flankendurchmesser des Schraubengewindes

$\varphi$ : Steigungswinkel des Schraubengewindes

$\rho_G$ : Reibungswinkel des Gewindes

$\rho_K$ : Reibungswinkel der Kopfauflage

$D_{KM}$ : Wirksamer Durchmesser in der Schraubenkopf- / Mutternauflage

Die Anteile der Momente am Anziehdrehmoment liegen im Normalfall bei ungefähr 10 % / 40 % / 50 % ( $M_{GSt}$  /  $M_{GR}$  /  $M_K$ ). Das Losdrehmoment  $M_L$  ist aufgrund der Richtung des Steigungsmomentes kleiner als das Anziehdrehmoment. Es berechnet sich:

$$M_L = -M_{GSt} + M_{GR} + M_K$$

Das selbsttätige Losdrehen von vorgespannten Schrauben setzt voraus, dass das Steigungsmoment größer ist, als der Widerstand aufgrund von Reibung. Die Bedingung für ein selbsttätiges Losdrehen ergibt sich, wenn das Losdrehmoment null wird:

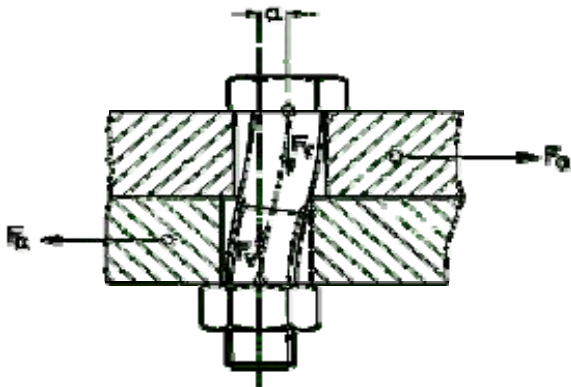
$$M_{GSt} \geq M_{GR} + M_K$$

$$\tan \varphi \geq \tan \rho_G + \frac{D_{KM}}{d_2} * \tan \rho_K$$

Unter normalen Reibungsbedingungen ist dies nicht möglich, da der Gewinde-Steigungswinkel den Wert  $4^\circ$  nicht überschreitet, während der Reibungswinkel  $\rho_G$  des Gewindes, ebenso wie der der Kopfauflage selbst bei bester Schmierung nicht kleiner als  $6^\circ$  wird [2].

Der Reibungswinkel kann aber deutlich gesenkt werden, wenn eine gegenseitige Verschiebung auftritt. Dies beruht auf einem physikalischen Effekt: „Wird die Reibungskraft zwischen zwei Körpern in einer Richtung überwunden, so kann eine zusätzliche Bewegung in eine andere Richtung durch Kräfte eingeleitet werden, die kleiner als die Reibungskraft sind“ [2]. Querkräfte können im Gewinde, unter dem Schraubenkopf, unter der Mutter und in den Trennfugen der verspannten Bauteile Relativbewegungen erzeugen. Durch die Relativbewegung

werden der Reibschluss und damit die Selbsthemmung der Schraubenverbindung aufgehoben. Beim wiederholten Auftreten dieser Relativbewegungen können sich auch hoch vorgespannte Schraubenverbindungen losdrehen. Wie in [14] gezeigt wird, können die Mikrogleitbewegungen in den Trennfugen nur auftreten, wenn die Grenzverschiebung  $a_{\text{grenz}}$  überschritten ist. Die theoretische Grenzverschiebung nach Gleichung (1) resultiert aus einem Modell bei dem die Schraube als beidseitig eingespannter Biegebalken angesehen wird und die eine Seite in Querrichtung verschoben wird. Für die Bestimmung von  $a_{\text{grenz}}$  hat die Klemmlänge  $l_k$  der Schraube einen großen Einfluss. Lange, biegeweiche Schrauben können den kleinen Querbewegungen durch Querverfederung folgen. Dadurch wird das Losdrehen der Schraube verhindert. Die Bestimmung der Grenzverschiebung  $a_{\text{grenz}}$  ist jedoch aufgrund der unbekanntenen Eingangsparmeter, insbesondere des Reibkoeffizienten  $\mu$ , nur angenähert möglich.

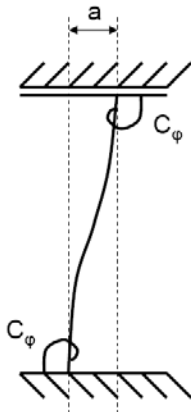


$$a_{\text{grenz}} \leq \frac{F_v \cdot l_k^3 \cdot \mu}{12 \cdot EI} \quad (1)$$

**Bild 2: Querbeanspruchte Schraubenverbindung** [14]

Neuere Veröffentlichungen zeigen, dass die theoretische Grenzverschiebung nach (1) zu große Werte liefert. In [9] wird vorgeschlagen die Nachgiebigkeit von Mutter und Schraubenkopf sowie eine weichere, realitätsnähere Abbildung des Schraubenschaftes anzusetzen. Dadurch wird die Grenzverschiebung deutlich reduziert.

Werden die Nachgiebigkeiten der Randeinspannung berücksichtigt, ergibt sich die Grenzgleitung unter der Voraussetzung gleicher Kopf- und Muttersteifigkeit  $C_{\phi,K} = C_{\phi,M}$  nach Gleichung (2). Problematisch ist, dass die Nachgiebigkeiten der Drehfedern bisher nicht bekannt sind.



$$a_{\text{grenz}} \leq F_V \cdot \mu \left[ \frac{l_k^3}{12 \cdot EI} + \frac{l_k^2}{2 \cdot C_\varphi} \right] \quad (2)$$

**Bild 3: Berücksichtigung der Randeinspannung**

In [14] werden folgende konstruktive Maßnahmen gegen das Losdrehen vorgeschlagen:

- hohe Montagevorspannkraft durch HV-Schrauben und kontrollierter Anziehverfahren
- Große Grenzverschiebung der Schrauben durch große Klemmlänge oder kleinen Schaftdurchmesser ( $l_k/d \geq 5$  nach [5])
- Größere Reibung
- Schlupfbegrenzung

### 2.3 Lockern

Lockern von Schraubenverbindungen beschreibt den Vorspannkraftverlust aufgrund von Setzen und Kriechen [2]. Unter Setzen versteht man im Allgemeinen das Einebenen von Oberflächenrauigkeiten in den Auflageflächen. Die Größe der Setzbeträge ist abhängig von der Höhe der Flächenpressung, der Anzahl der Trennfugen, der Oberflächenrauigkeit, der Beschichtung, der Temperatur und der Art der Belastung. Bereits beim Anziehvorgang treten Setzvorgänge auf. Im Stahlbau ist insbesondere die Art und Dicke der Beschichtung von Bedeutung. Die Setzneigung von unterschiedlichen Beschichtungssystemen unter statischer Belastung wurde am Institut für Stahlbau in Leipzig von Katzung untersucht [8]. Für verschiedene Beschichtungssysteme wurde der zeitliche Verlauf der Schraubenvorspannkraft ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass der Setzvorgang innerhalb weniger Tagen weitestgehend abgeschlossen ist [16]. In DIN 18800-7 [3] werden Angaben zu der Größe der Vorspannkraftverluste infolge Setzens gemacht. Alternativ können Setzverluste durch zeitnahes Nachspannen ausgeglichen werden.

Zusätzlich zu den statischen Setzbeträgen gibt es Setzungen aufgrund von Gleiten in den einzelnen Trennfugen der Verbindung. Dieses so genannte zyklische Setzen ist bisher noch wenig untersucht worden (z.B. [12]). Es ist allerdings zu erwarten, dass durch das Gleiten ein verstärkter Abrieb entsteht, welcher die Setzbeträge deutlich vergrößert.

Wenn die Grenzflächenpressung bei der Montage oder im Betriebsfall überschritten wird, kann es zum Kriechen kommen (zeitabhängiges Plastizieren des Werkstoffs). Aufgrund der plastischen

---

Verformungen kommt es zum Vorspannkraftverlust [10]. Dieser Effekt ist bei stahlbautypischen Schraubenverbindungen allerdings vernachlässigbar.

Die Auswirkungen des Lockerns sind abhängig von der Dehnsteifigkeit der Schraube. Bei gleichem Setzbetrag ( $\Delta l_s$ ) ist der Vorspannkraftverlust ( $\Delta F$ ) bei dehnweichen Schrauben geringer ( $C_s$  Dehnsteifigkeit der Schraube). Dieser Zusammenhang spiegelt sich in der Formel nach [11] wieder:

$$\Delta F = \Delta l_s \cdot C_s \quad (3)$$

Für die Ermittlung der Schraubensteifigkeit gibt es unterschiedliche Modelle (z.B. [2]). Ein einfacher Ansatz nach [11] ist:

$$C_s = EA_{Sch} / l \quad (4)$$

$A_{Sch}$ : Schaftquerschnitt

$l$ : Klemmlänge

Durch konstruktive Regeln kann die Dehnsteifigkeit von Schrauben gesteuert werden. Durch die geringere Dehnsteifigkeit längerer Schrauben werden die Auswirkungen von Setzungen verringert.

Die Umsetzung dieses Prinzips in einer geschraubten Anschlusskonstruktion kann mit einer Reduzierung der Schraubendurchmesser und entsprechender Erhöhung der Schraubenanzahl oder die Vergrößerung der Klemmlänge (z.B. durch Hülsen oder Futterblechen) erreicht werden.

## 2.4 Reibung

### 2.4.1 Gleitfugen

Bei den untersuchten Probekörpern handelt es sich um einschnittige Schraubenverbindungen. Da im weiteren Verlauf des Forschungsberichtes des Öfteren auf ein Gleiten zwischen den einzelnen Trennfugen eingegangen wird, ist es erforderlich die unterschiedlichen Fugen zu differenzieren:

1. Muttergewinde
2. Mutter – Unterlegscheibe
3. Unterlegscheibe – Blech
4. Blech – Blech
5. Blech – Unterlegscheibe
6. Unterlegscheibe – Schraubenkopf

Um den Sprachgebrauch zu vereinfachen, werden die Trennfugen 2 und 3 sowie 5 und 6 als „Trennfuge Mutter und Blech sowie Schraubenkopf und Blech“ zusammengefasst.

## 2.4.2 Coulombsche Reibungsgesetz

Die trockene oder auch Coulombsche Reibung beschreibt die Kraftverhältnisse zwischen zwei festen Körpern. Dieses Reibgesetz ist unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche, der Rauigkeit und der Geschwindigkeit, der Bewegung. Der Reibungskoeffizient oder auch Reibbeiwert  $\mu$  ist der Quotient aus Reibungskraft  $F_R$  und Normalkraft  $F_N$ .

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (5)$$

Bei der Coulombschen Reibung wird zwischen Haft- und Gleitreibung differenziert. Die Haftreibung ist in der Regel größer als die Gleitreibung. Zur Vereinfachung kann hier der Haft- und der Gleitreibungskoeffizient gleichgesetzt werden. Im weiteren Verlauf des Forschungsberichtes wird daher nur vom Reibbeiwert gesprochen.

## 2.4.3 Adhäsion

Bei Kontaktsituationen gibt es zwischen zwei Körpern eine wechselseitige Anziehungskraft, die mit dem wachsenden Abstand zwischen den Oberflächen stark abfällt. Diese klebende Wirkung nennt man Adhäsion. Die Größe der aus der Adhäsion resultierenden Anziehungskräfte ist in der makroskopischen Welt sehr gering. Sie hängt ab vom Material der beiden Körper, vom Abstand und der Rauigkeit. Dabei steigen die Adhäsionskräfte mit der Verringerung des Abstandes und der Rauigkeit.

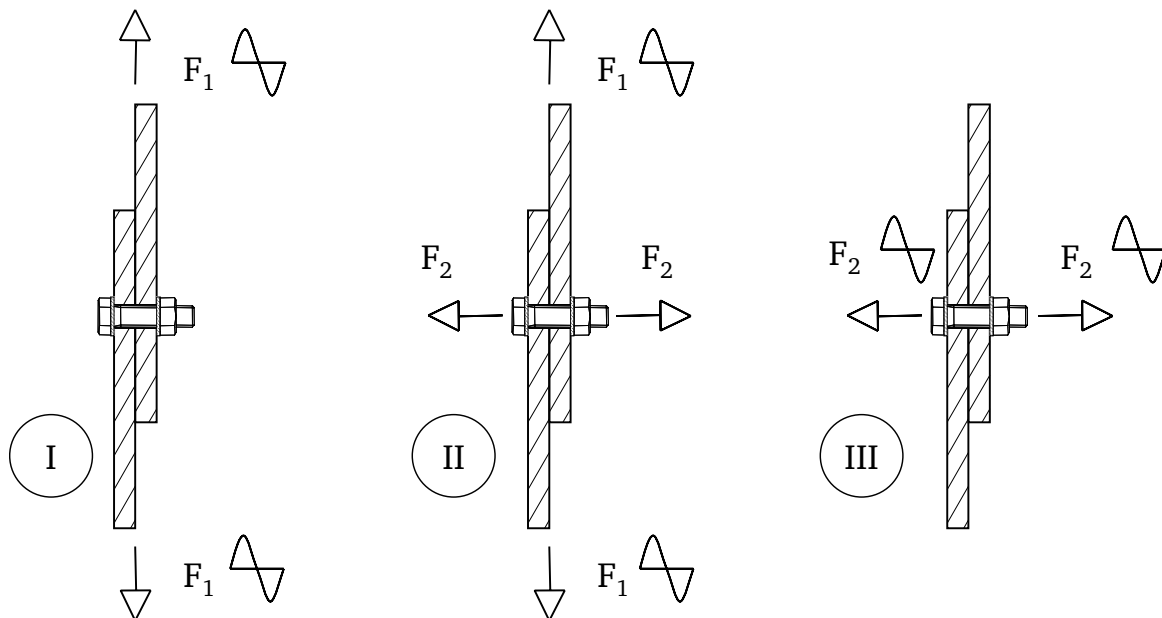
In mehreren Versuchen (z.B. [13]) hat sich gezeigt, dass bei GV-Verbindungen der Reibbeiwert nach dem Aufbringen einer zyklischen Belastung (kein Gleiten) ansteigt. Dieses Phänomen wird „Trainieren“ von Schraubenverbindungen genannt. Hintergrund der Reibbeiwertvergrößerung ist das Einebnen von Oberflächenrauigkeiten auf mikroskopischer Ebene. Dadurch werden die Adhäsionskräfte gesteigert.

## 3 Versuchsprogramm

### 3.1 Schematischer Versuchsaufbau

Im Rahmen der Losdrehversuche wurden einschnittige Einschraubenverbindungen untersucht. Die zyklische Belastung wurde weggesteuert aufgebracht. Prinzipiell wurden Versuche mit drei verschiedenen Belastungsarten durchgeführt (siehe Bild 4):

1. zyklisch querbelastete, einschnittige SL-Verbindung (I)
2. zyklisch querbelastete, einschnittige SL-Verbindung mit zusätzlicher, konstanter Kraft in Schraubenlängsrichtung (II)
3. zyklisch in Schraubenlängsrichtung belastete Verbindung (III)



**Bild 4:** Belastungsarten der unterschiedlichen Versuche

Die Schrauben wurden mittels Drehmomentenschlüssel angezogen. Die Schraubenkraft wurde mit in den Schaft eingeklebten Dehnmessstreifen (DMS) gemessen (siehe Kapitel 3.4). In Tabelle 1 ist das Versuchsprogramm aufgelistet. Die Versuchsreihen Nummer 1-12 und 20-33 entsprechen Typ I, Versuchsreihe 13-17 entspricht Typ II und Versuchsreihe entspricht 18-19 Typ III.

Die Systemskizzen der Versuche sind in Anhang C aufgeführt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Nummer	Schrauben	Festigkeits- klasse	Beschich- tung	$I_k$	Z [kN]	Anzahl der Versuche	Bemerkung	
1	M20	10.9	hart	40	0	3	Klemmlängeneinfluss	
2	M20	10.9	hart	60	0	3		
3	M20	10.9	hart	80	0	3		
4	M20	10.9	hart	90	0	3		
5	M20	10.9	hart	100	0	3		
6	M20	10.9	hart	120	0	3		
7	M20	10.9	weich	40	0	3	Einfluss der Beschichtung	
8	M20	10.9	weich	60	0	3		
9	M20	10.9	weich	80	0	3		
10	M20	10.9	weich	90	0	3		
11	M20	10.9	weich	100	0	3		
12	M20	10.9	weich	120	0	3		
13	M20	10.9	hart	40	60	3	Zugeneinfluss	
14	M20	10.9	hart	60	60	3		
15	M20	10.9	hart	80	60	3		
16	M20	10.9	hart	100	60	3		
17	M20	10.9	hart	120	60	3		
18	M20	10.9	hart	40	20-110	3		Reiner Zug als Referenz
19	M20	10.9	hart	100	20-110	3		
20	M16	10.9	hart	32	0	3	Größeneinfluss	
21	M16	10.9	hart	40	0	3		
22	M24	10.9	hart	48	0	3		
23	M24	10.9	hart	40	0	3		
24	M20	8.8	hart	40	0	3		Festigkeitsklasseneinfluss
25	M20	8.8	hart	100	0	3		
26	M20	10.9	hart	40	0	3	Verschiebung +/- 1 mm	
27	M20	10.9	hart	40	0	3		Verschiebung +/- 0,5 mm
28	M20	10.9	hart	40	0	3		
29	M20	10.9	hart	40	0	3	plastisch verspannt	
30	M20	10.9	hart	40	0	3	Nordlock +/- 2 mm	
31	M20	10.9	hart	40	0	3	Nordlock +/- 1 mm	
32	M20	10.9	hart	60	0	3	Blechdicke durch Futterbleche	
33	M20	10.9	hart	100	0	3	Blechdicke durch Futterbleche	
<b>SUMME</b>						<b>99</b>		

## 3.2 Material

### 3.2.1 Schrauben

Die Schrauben wurden von den Firmen PEINER Umformtechnik GmbH, August Friedberg GmbH und Reyher Nchfg. GmbH & Co. KG kostenlos zur Verfügung gestellt.

Bei den Schrauben handelt es sich um HV-Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 (DIN EN ISO 4014) und 10.9 (DIN EN 14399-4) mit Durchmessern von M16, M20 und M24. Die Oberflächen sind feuerverzinkt und geschmiert.

### 3.2.2 Bleche

Die Bleche wurden mit der Stahlgüte S235 bestellt. Die Bleche waren für alle Versuchsreihen mit einem Lochspiel von 2 mm versehen. Alle Bleche waren Sa2½ gestrahlt und dünn beschichtet. Außer bei den Versuchsreihen 7-12 wurde vor den Versuchen die Beschichtung mit einem Winkelschleifer entfernt, so dass blanke Bleche verwendet wurden. Die Bleche der Versuchsreihen 7-12 waren definiert mit Epoxydharz beschichtet. Die real gemessenen Schichtdicken sind in Tabelle 2 aufgeführt. Dabei werden die vier vorhandenen Flächen unterschieden. „Unter Mutter“ und „Unter Kopf“ sind die Auflageflächen der Unterlegscheiben von Schraubenmutter und Schraubenkopf. Die „Innenflächen“ sind die Kontaktflächen der verwendeten Bleche.

Versuchsreihe	Versuchsnummer	Unter Mutter [μm]	Innenfläche 1 [μm]	Innenfläche 2 [μm]	Unter Kopf [μm]	Gesamt [μm]
7	1	20	90	115	35	260
7	2	40	95	80	40	255
7	3	60	105	100	40	305
8	1	30	110	115	45	300
8	2	45	130	135	35	345
8	3	60	130	110	65	365
9	1	70	35	80	110	295
9	2	110	120	90	70	390
9	3	70	70	90	70	300
10	1	150	80	60	170	460
10	2	145	75	85	125	430
10	3	110	70	80	140	400
11	1	130	60	120	120	430
11	2	140	110	60	150	460
11	3	120	90	60	90	360
12	1	130	70	75	150	425
12	2	220	65	65	160	510
12	3	180	60	60	160	460

Tabelle 2: Schichtdicken der Epoxydharzbeschichtung (Reihe 7-12)

Um Material zu sparen, waren die großen Blechdicken ( $B_l > 40$  mm) durch dünnere Bleche ( $t = 20$  mm) mit aufgeschweißten Blechen ( $t = 10-40$  mm;  $100 \times 100$  mm) im Bereich der Bohrung

---

realisiert worden. Hierbei muss angemerkt werden, dass aufgrund des Schweißverzuges die Bleche nicht eben waren. Bei den Versuchen war die Verwölbung deutlich zu erkennen.

### 3.3 Messungen

Gemessen wurde über einen Messverstärker (Spider 8) in Kombination mit einer Aufzeichnungssoftware (Catman 5). Aufgezeichnet wurden die Kräfte und Verschiebungen des Hydraulikzylinders, die Schraubenkraft (gemessen über einen Dehnungsmessstreifen) und Verformungen von induktiven Wegaufnehmern (ABM Taster W10).

In wenigen Versuchen wurde auch die Verdrehung der Mutter und des Schraubenkopfes gemessen. Diese Verdrehungsmessungen liegen allerdings nur für die Versuchsreihe 24 vor.

### 3.4 Messen der Schraubenkraft

#### 3.4.1 Präparieren der Schrauben

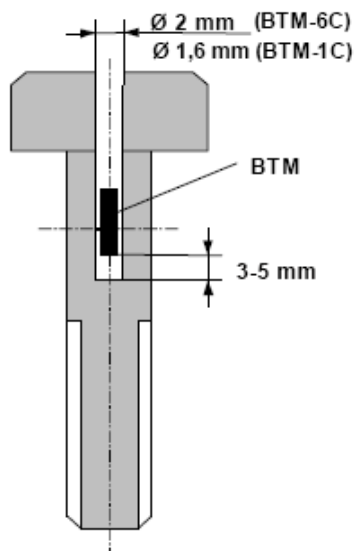
Die Schraubenkräfte wurden mit in den Schaft eingeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Dafür wurden DMS vom Typ BTM-6C der Firma Preusser Messtechnik verwendet. Die DMS haben eine maximale Dehnbarkeit von 0,5% (5000  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). Entsprechend der Anleitung des Herstellers wurde durch den Kopf der Schrauben ein 2 mm durchmessendes Loch gebohrt. Die Löcher waren ca. 30 mm tief. Nach dem Bohren wurde das Bohrloch mit Azeton gereinigt und im Wärmeschrank bei ca. 50<sup>o</sup>C getrocknet. Mit Spritze und Kanüle wurde der Klebstoff (Zweikomponentenkleber X60) in das Bohrloch eingebracht und anschließend der DMS eingeführt. Beim Anbringen des DMS wurde darauf geachtet, dass der DMS nicht direkt am Bohrgrund anliegt, um das Messen von Singularitäten an der Bohrspitze zu vermeiden. Im Anschluss härtete der Kleber über Nacht aus. Zum Abnehmen des Messsignals wurde ein Lötstützpunkt auf der Schraube mit Z40 Schnellkleber befestigt. Bild 5 zeigt den Schraubenkopf einer präparierten Schraube.

#### 3.4.2 Kalibrieren der Schrauben

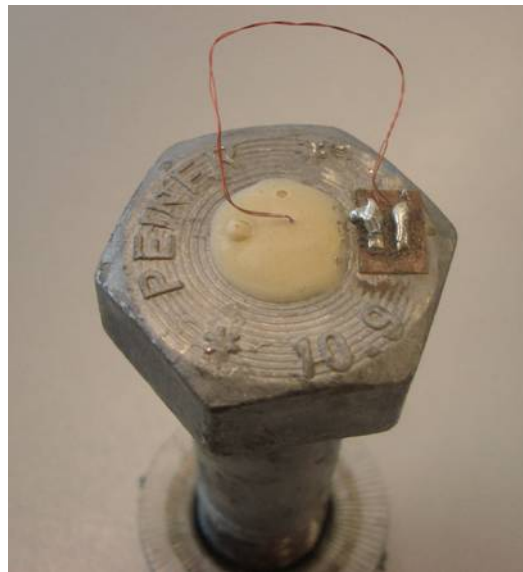
Nach dem Präparieren wurden die Schrauben an einer Prüfmaschine kalibriert. Dafür wurden die Schrauben in Glocken eingebaut und mit der Prüfmaschine eine Kraft (F) von 70 kN angefahren. Über den Zusammenhang zwischen Dehnung des DMS ( $\varepsilon_{\text{DMS}}$ ) und der Schraubensteifigkeit (EA)

$$F = \varepsilon_{\text{DMS}} EA k_{\text{kalib}} \quad (2)$$

wurde ein Kalibrierungsfaktor ( $k_{\text{kalib}}$ ) für jede Schraube ermittelt. Die Kalibrierungsfaktoren liegen im Bereich von 0,9 bis 1,1.



(<sup>1</sup>)



**Bild 5: DMS in der Schraube**

### 3.4.3 Genauigkeit der Schraubenmessung

Am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TUD wurden in den letzten Jahren viele Erfahrungen mit dem Messen von Schraubenkräften gesammelt. In mehreren Forschungsvorhaben wurden Kräfte in Schrauben mit eingeklebtem DMS ermittelt. Trotzdem ist die Messung fehleranfällig und die Applikation der DMS benötigt ein gewisses handwerkliches Geschick. Schrauben, die beim Kalibrieren auffällig waren (z.B. großer Kalibrierungsfaktor, unterschiedliches Verhalten beim Be- und Entlasten), wurden nicht weiterverwendet und neu präpariert.

Die Schrauben wurden nicht für die maximale Beanspruchung kalibriert (maximale Kalibrierungskraft 70 kN), um die Gewindegeometrie nicht übermäßig zu belasten und damit das Anziehverhalten nicht zu beeinflussen. Es wird davon ausgegangen, dass der Kalibrierungsfaktor sich bei höheren Belastungen nicht verändert.

Bei früher durchgeführten Langzeitversuchen hat sich gezeigt, dass die gemessene Schraubenkraft in manchen Fällen leicht abfällt. Es wird vermutet, dass der Kleber zum Befestigen der DMS unter Last kriecht. Die hier beschriebenen Versuche haben eine Dauer von maximal 2h. Der Kriecheinfluss kann dabei als vernachlässigbar eingestuft werden.

Insgesamt wird die Genauigkeit der Schraubenkraftmessung mit  $\pm 10\%$  eingeschätzt.

<sup>1</sup> Datenblatt der Firma Preusser Messtechnik

### 3.5 Versuchsdurchführung

#### 3.5.1 Last-Verformungskurve

Vorab wurden von den Reihen 1-6 Last-Verformungs-Kurven erstellt. Die Versuche sind statisch weggesteuert gefahren worden. Ziel war es, die mögliche Verformung der SL-Verbindung zu untersuchen. Der Versuchsaufbau entspricht dem in Bild 6.

#### 3.5.2 Allgemein

Die Versuche wurden mit einem servohydraulisch gesteuerten Zylinder mit einer Nennlast von 20 t gefahren. Die Bleche wurden mittels Adapter (vier Schrauben M20 10.9 mit 300 Nm vorgespannt) angebracht. Um Exzentrizitäten zu reduzieren, wurde die Lastebene in die Scherebene der Bleche gelegt. Bild 6 zeigt die Adapter und die eingespannten Bleche mit der Krafrichtung. Die Bleche wurden so eingestellt, dass die Löcher übereinander liegen. Die zu testende Schraube wurde an die Messstelle angeschlossen und anschließend mittels Drehmomentschlüssel vorgespannt. Tabelle 3 zeigt das verwendete Anziehverfahren für die jeweilige Versuchsreihe. Nach dem Anziehen wurde die Lage der Mutter gegenüber der Schraube markiert, um ein mögliches Verdrehen beobachten zu können.

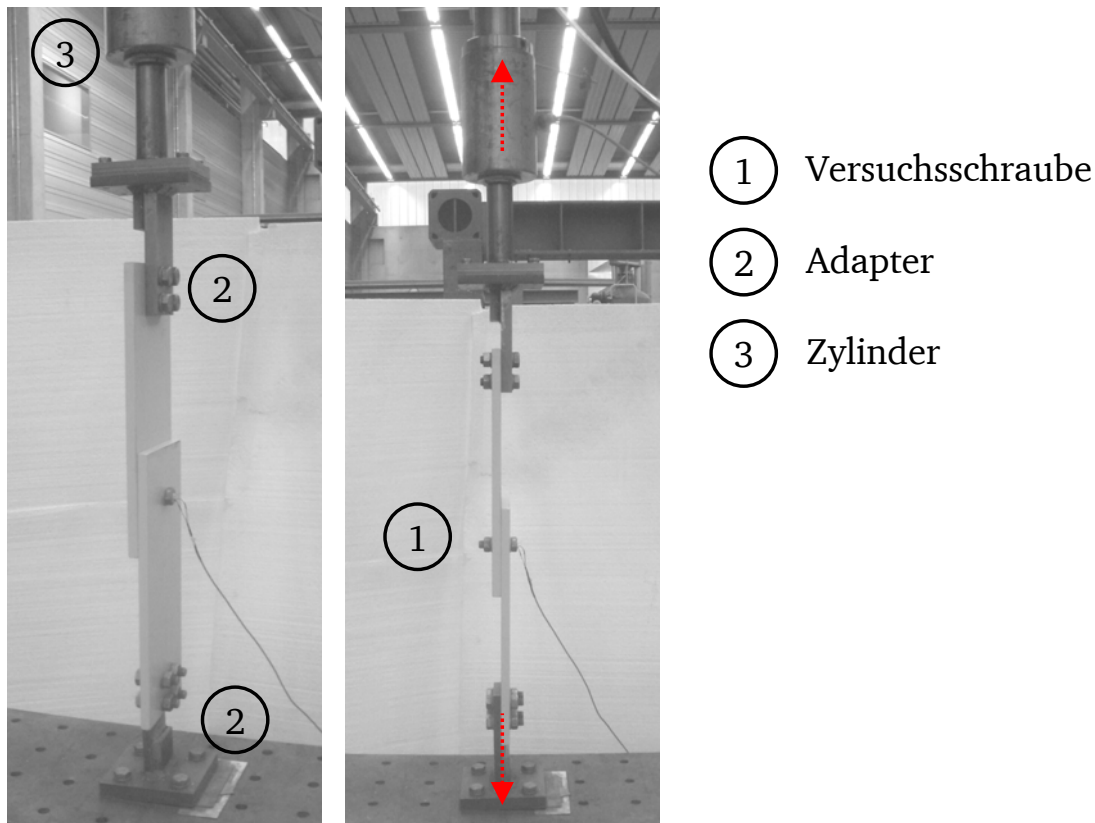


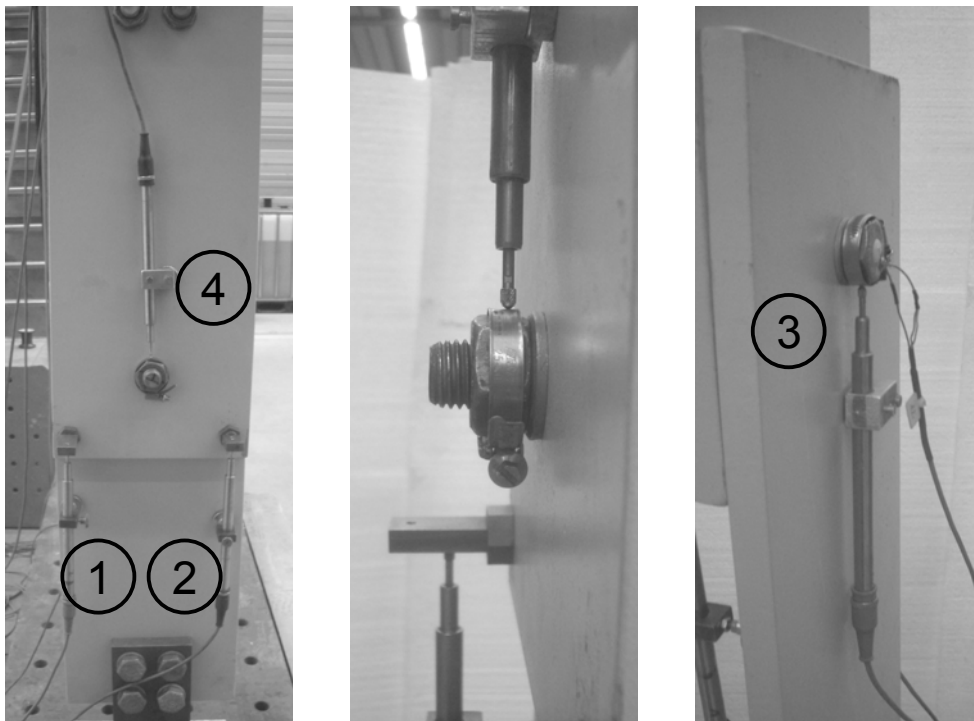
Bild 6: Versuchsaufbau (ohne Wegaufnehmer)

Versuchsreihe	Schraube	Anziehverfahren	Beschreibung
1-19 26-28 32-33	M20 10.9	Drehmomentenverfahren <sup>1</sup>	Anzugsmoment 450 Nm
20-21	M16 10.9	Drehmomentenverfahren <sup>1</sup>	Anzugsmoment 250 Nm
22-23	M24 10.9	Drehmomentenverfahren <sup>1</sup>	Anzugsmoment 650 Nm
24-25	M20 8.8	Drehmomentenverfahren <sup>1</sup>	Anzugsmoment 300 Nm
29	M20 10.9	Kombiniertes Verfahren <sup>1</sup>	Voranziehmoment 340 Nm Weiterdrehwinkel 60°
30-31	M20 10.9	Drehmomentenverfahren <sup>2</sup>	Anzugsmoment 506 Nm

<sup>1)</sup> Anziehverfahren nach [DIN 18800-7]  
<sup>2)</sup> Anziehverfahren nach NORD-LOCK Prüfzeugnis [1]

**Tabelle 3: Anziehverfahren**

Im Anschluss wurden die induktiven Wegaufnehmer W10 angebracht. Zwei Wegaufnehmer messen die Verschiebung zwischen den Blechen (Wegaufnehmer Nr. 1 und 2). Jeweils ein Wegaufnehmer misst die Verschiebung zwischen Schraubenkopf und Blech (Wegaufnehmer Nr. 3) und Mutter und Blech (Wegaufnehmer Nr. 4). Um bei einer möglichen Rotation der Schraube gute Ergebnisse zu erzielen, wurde die Sechskantoberfläche der Schraube und Mutter mittels einer Rohrklemme umgeben. Bild 7 zeigt die Position der Wegaufnehmer.



**Bild 7: Position der Wegaufnehmer**

Die Versuche wurden mit einer Frequenz von 0,1 bis 0,5 Hz gefahren. Die meisten Versuche wurden mit einer Frequenz von 0,2 Hz gestartet. Im Laufe des Versuchs wurde die Frequenz auf 0,4 Hz gesteigert. Die Steuerung erfolgte angepasst an die Verschiebung zwischen den Blechen (Mittelwert der Wegaufnehmer 1 und 2). Diese wurde in Echtzeit ausgegeben, überwacht und entsprechend nachgeregelt. Im Regelfall wurden die Losdrehversuche mit einer zyklischen Verschiebung von  $\pm 2$  mm (siehe Kapitel 4.1) weggesteuert gefahren.

Der Versuch wurde beendet, wenn die Schraubenkraft gegen Null ging oder 1000 Lastwechsel erreicht waren. Am Ende der Versuche wurde die Schraube aufgedreht und der Nullwert der Schraubenkraftmessung festgestellt.

### 3.5.3 Zugeinfluss (Reihe 13-17)

Bei den Versuchsreihen 13-17 wurde eine zusätzliche, statische Kraft in Schraubenlängsachse aufgebracht. Dafür wurden nach dem Verspannen zwei Adapter an die Bleche angeschraubt und mit einer Spindel eine Kraft von 60 kN aufgebracht. Die Dehnung der Spindel wurde mit zwei angeklebten DMS gemessen. Aus den Dehnungen konnte die Kraft zurückgerechnet werden. Die DMS der Spindel wurden vorab in einer Prüfmaschine kalibriert.

Beim Anziehen der Spindel findet ein Anstieg der Schraubenkraft statt. Um die wirkliche Schraubenkraft messen zu können, wurden nach mehreren Lastspielen der Zylinder angehalten und die Spindelkraft gelöst.

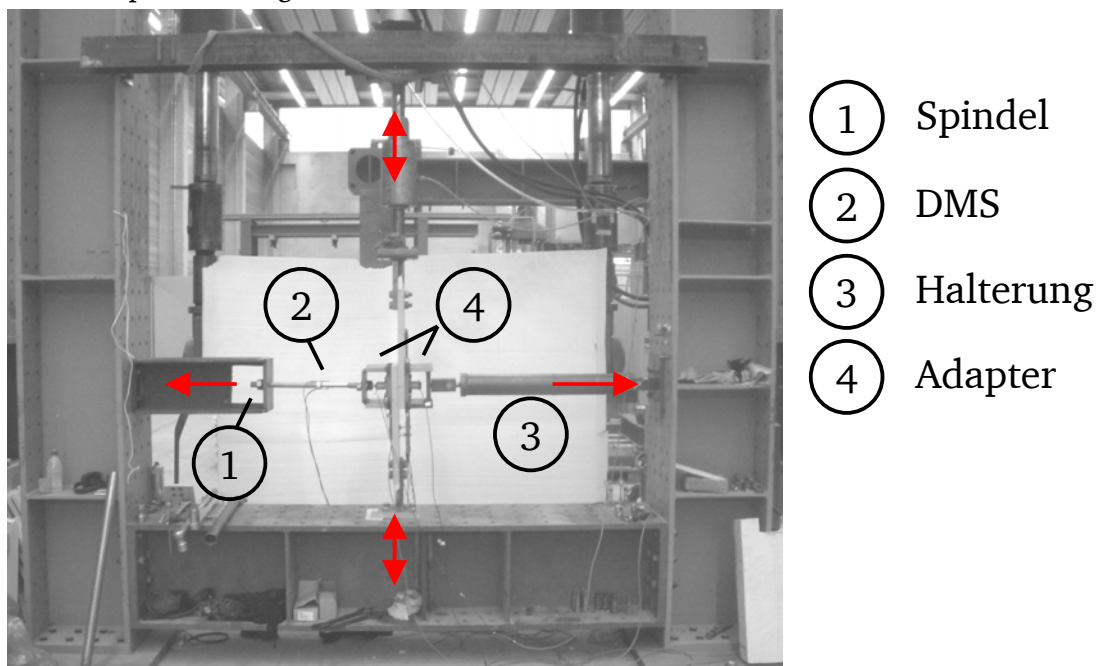
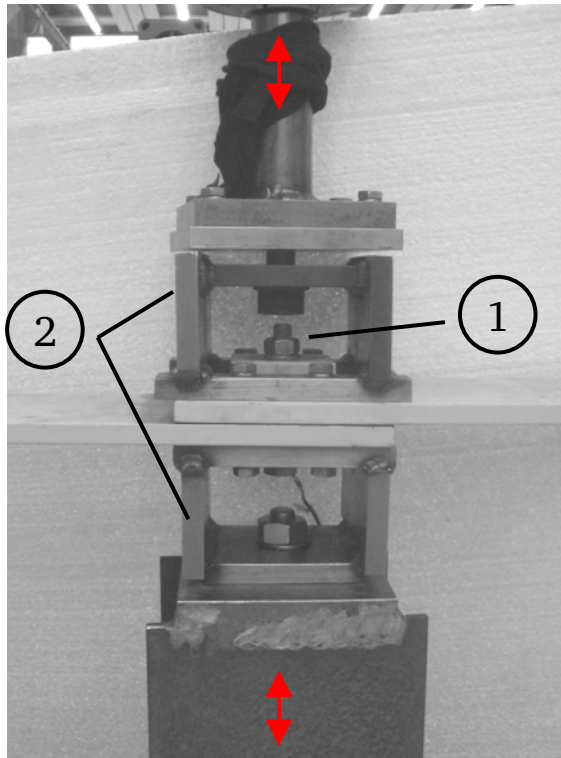


Bild 8: Versuchsaufbau mit Zugkraft (Reihe 13-17)

### 3.5.4 Zyklische Zugbelastung (Reihe 18-19)

Die Versuchsreihen 18 und 19 waren Versuche mit reiner zyklischer Zugkraft in Schraubenlängsrichtung. Dabei wurde mit dem 20 t Hydraulikzylinder eine Zugkraft zwischen +20 und +120 kN kraftgesteuert aufgebracht.



- ① Versuchsschraube
- ② Adapter

**Bild 9: Versuchsaufbau der zyklischen Zugversuche (Reihe 18 und 19)**

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Last-Verformungs-Kurven

Die Last-Verformungs-Kurven der Reihen 1-6 sind in Bild 10 und Bild 11 dargestellt. Man erkennt die für SL-Verbindungen typische Last-Verformungs-Beziehung: Mit dem Start der Belastung erfolgt ein linearer Anstieg der Verformung (elastische Verformung der Bleche). Dieser endet in einem annähernd horizontalen Plateau (Gleiten zwischen den Blechen). Wird die Verbindung weiter verformt, steigt die Kraft wieder linear an (Schraubenschaft liegt an der Lochwand an). Die Last-Verformungs-Kurven sind im Druck- und Zugbereich prinzipiell gleich. Bei den Verbindungen stellt sich eine Verformbarkeit bis zum Anliegen der Schraube von ca.  $\pm 2$  mm ein. Dieser Bereich wurde in den Losdrehversuchen möglichst voll ausgenutzt.

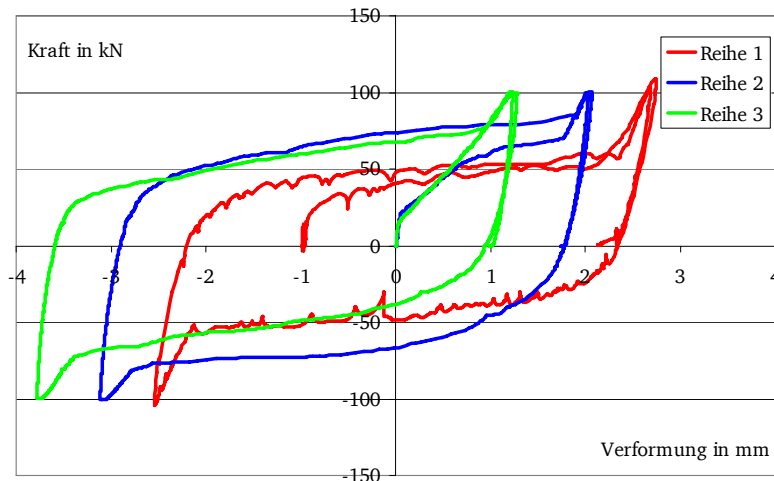


Bild 10: Last-Verformungs-Kurve der Reihen 1-3

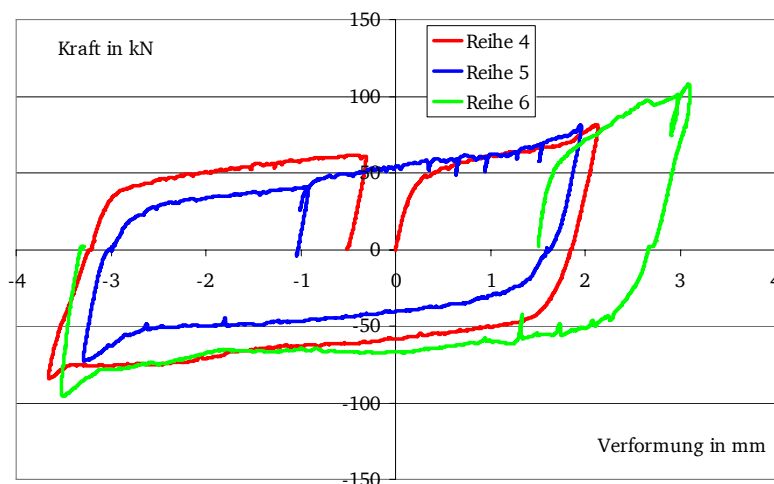


Bild 11: Last-Verformungs-Kurve der Reihen 4-6

---

## 4.2 Ergebnisse der Losdrehversuche

Die wichtigsten Ergebnisse der Losdrehversuche sind die Entwicklungen der Vorspannkraft in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl. Da die Versuche weitestgehend weggesteuert gefahren werden, wird hier anstelle von Lastwechselzahl der Begriff „Wegzyklus“ eingeführt. Damit wird die Anzahl der Verschiebungen beschrieben. Der Begriff Wegzyklus soll Verwechselungen mit Lastwechsel, die nicht unbedingt zu einem Gleiten der Verbindung führen müssen, vermeiden.

Die Ergebnisse werden als Diagramm „Vorspannkraft über Wegzyklen“ dargestellt. Auf der Abszisse sind die Wegzyklen, auf der Ordinate die auf die jeweiligen Anfangswerte bezogenen Vorspannkraften dargestellt. In diesem Kapitel sind Kurven von arithmetischen Mittelwerten der einzelnen Versuchsreihen dargestellt. Die Einzelergebnisse sind im Anhang A aufgeführt. Dort sind alle Vorspannkraftverläufe mit Absolut- und Relativwerten aufgeführt. Da bei der Versuchsdurchführung nicht alle Versuche verwertbare Ergebnisse geliefert haben, sind teilweise Versuche wiederholt worden. Diese sind bei der Beschreibung im Anhang mit dem Index „n“ gekennzeichnet. Es wurde darauf geachtet, dass für jede Versuchsreihe mindestens zwei verwertbare Ergebnisse vorliegen.

Im Anhang B sind die Verformungen der Versuche dargestellt. Dabei sind für jeden Versuch die mittlere Gleitung der Platten durch zwei Extremkurven (Minimum und Maximum) und die Gleitungen von Kopf und Mutter relativ zu den Blechen dargestellt.

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die Ergebnisse der einzelnen Gruppen von Versuchsreihen vorgestellt.

#### 4.2.1 Klemmlängeneinfluss

Mit den Reihen 1-6 wurden unterschiedliche Klemmlängen untersucht. Getestet wurden planmäßig vorgespannte Schraubenverbindungen M20 10.9 mit unbeschichteten Blechen. Die verwendeten Klemmlängen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die weggesteuerten Versuche haben eine zyklisch Verschiebung von  $\pm 2$  mm.

In Bild 12 sind die Mittelwerte der Vorspannkraft für die Reihen 1-6 dargestellt. Man erkennt, dass ab der Klemmlänge 90 mm (Reihe 4) der Vorspannkraftverlust deutlich verzögert wird.

Versuchsreihe	Klemmlänge $l_k$	Klemmlänge/ Durchmesser $l_k/d$
1	40	2
2	60	3
3	80	4
4	90	4,5
5	100	5
6	120	6

Tabelle 4: Klemmlängen der Versuchsreihen 1-6

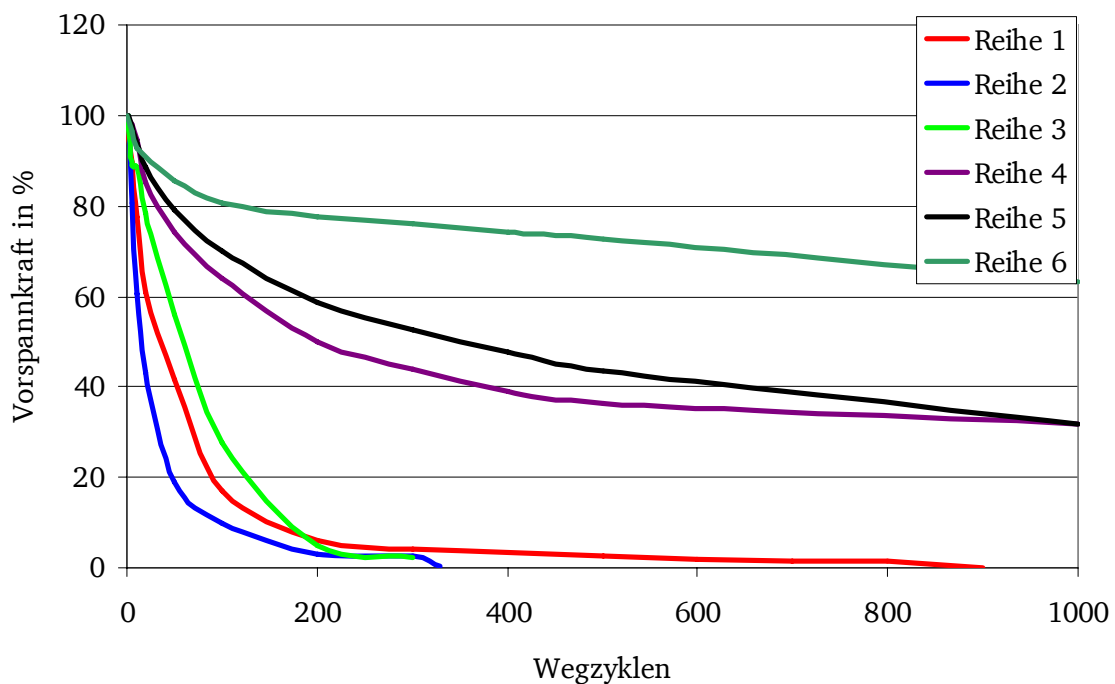
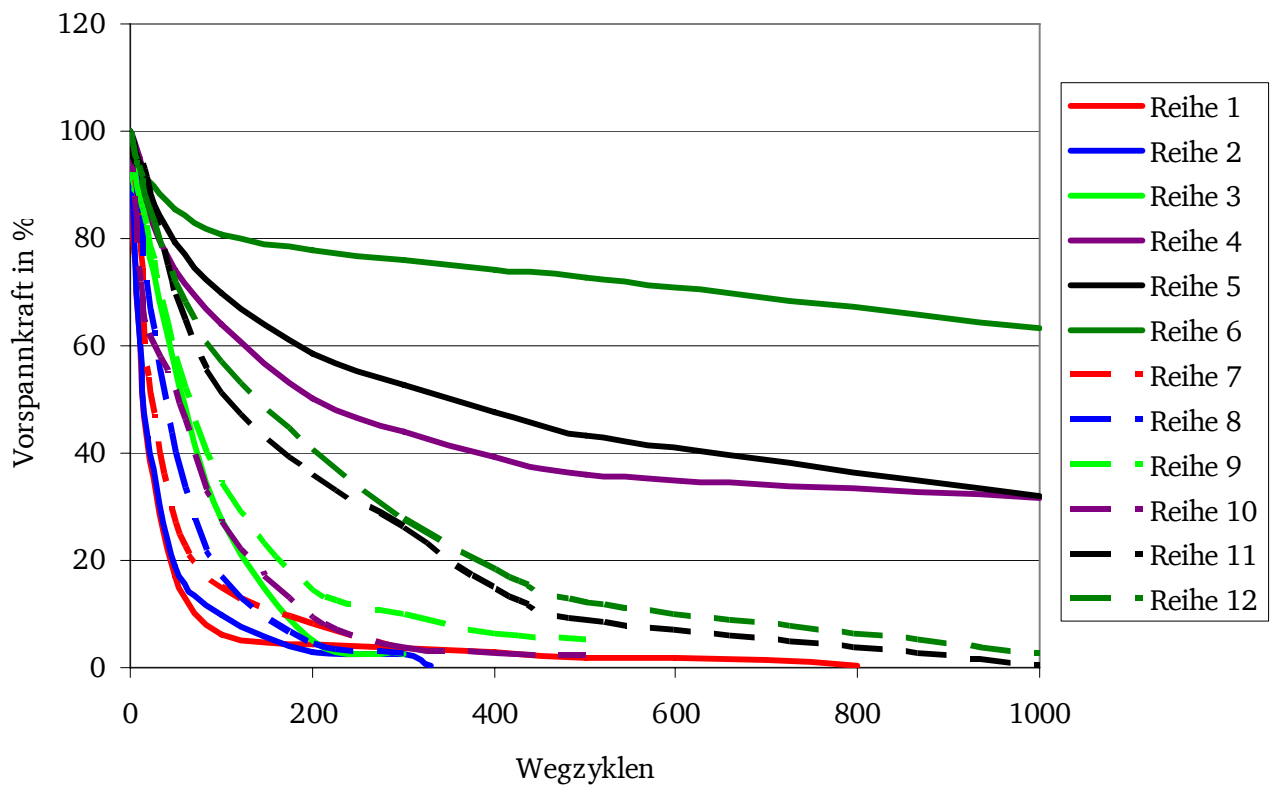


Bild 12: Einfluss der Klemmlänge

#### 4.2.2 Einfluss der Beschichtung

Mit den Reihen 7-12 wurden Bleche unterschiedlicher Klemmlänge mit einer Epoxydharzbeschichtung (Tabelle 2) getestet. Verglichen mit den unbeschichteten Versuchsreihen 1-6 kann der Einfluss einer Beschichtung bestimmt werden. In Bild 13 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Kurven gleicher Farbe repräsentieren gleiche Klemmlängen. Die durchgezogenen Kurven sind die unbeschichteten Bleche, die gestrichelten zeigen die Versuchsergebnisse von den beschichteten Blechen. Zu erkennen ist, dass bei den Versuchen mit Beschichtung keine der untersuchten Klemmlängen ausreicht, um den Vorspannkraftverlust nachhaltig zu verzögern.



**Bild 13: Einfluss einer Epoxydharzbeschichtung**

Nach dem Auseinanderbauen der Bleche war der Abrieb der Beschichtung vor allem unter Schraubenkopf und Mutter, aber auch zwischen den Blechen deutlich zu erkennen.

### 4.2.3 Einfluss einer äußeren Zugkraft

In den Versuchsreihen 13-17 wurde zusätzlich zur Querbeanspruchung noch eine in Schraubensichtungsrichtung wirkende, konstante Kraft (60 kN) aufgebracht. Die Ergebnisse sind in Bild 14 dargestellt. Die durchgezogenen Kurven zeigen die Ergebnisse. Verglichen werden sie mit den Ergebnissen aus den Versuchen ohne Zugkraft (Reihe 1-6, gestrichelt). Gleichfarbige Kurven stehen für gleiche Klemmlängen. Vergleicht man die Kurven gleicher Klemmlänge, liegen die Versuche mit Zugkraft (Ausnahme der Kurven 5 und 16) immer oberhalb der vergleichbaren Versuche ohne Zugkraft.

Bei zwei von drei Versuchen der Reihe 17 endete der Versuch nach ca. 1000 Wegzyklen mit dem Dauerbruch der Schraube.

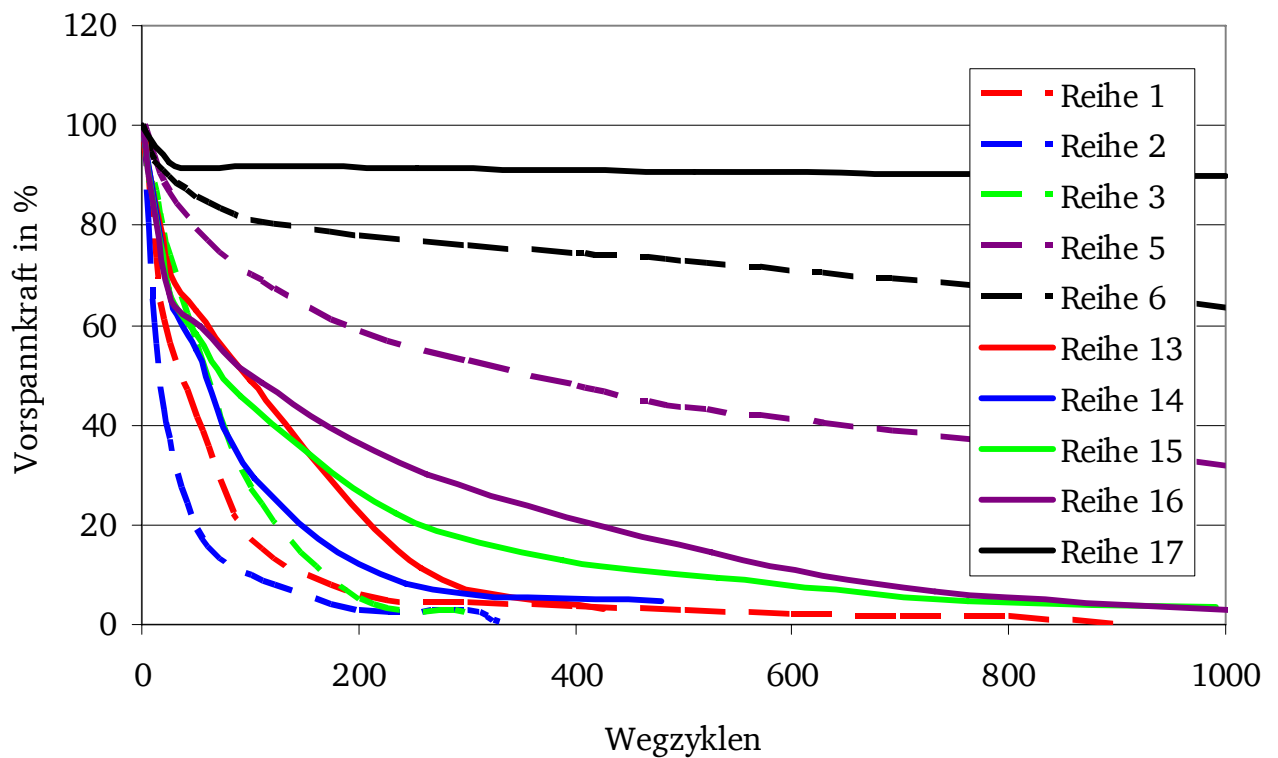


Bild 14: Einfluss äußerer Zugkräfte

#### 4.2.4 Zyklischer Zugversuch

Mit den Versuchsreihen 18 und 19 wurden zyklische Zugversuche durchgeführt. Dabei wurden zwei Klemmlängen unterschieden:  $l_k = 40 \text{ mm}$  (Reihe 18) und  $l_k = 100 \text{ mm}$  (Reihe 19). Die Ergebnisse sind in Bild 15 dargestellt. Verglichen werden sie mit den querbeanspruchten Versuchen gleicher Klemmlänge (gestrichelte Kurve). Man erkennt, dass die Vorspannkraft in den Zugversuchen nur gering abfällt und sich dann auf einem hohen Niveau stabilisiert.

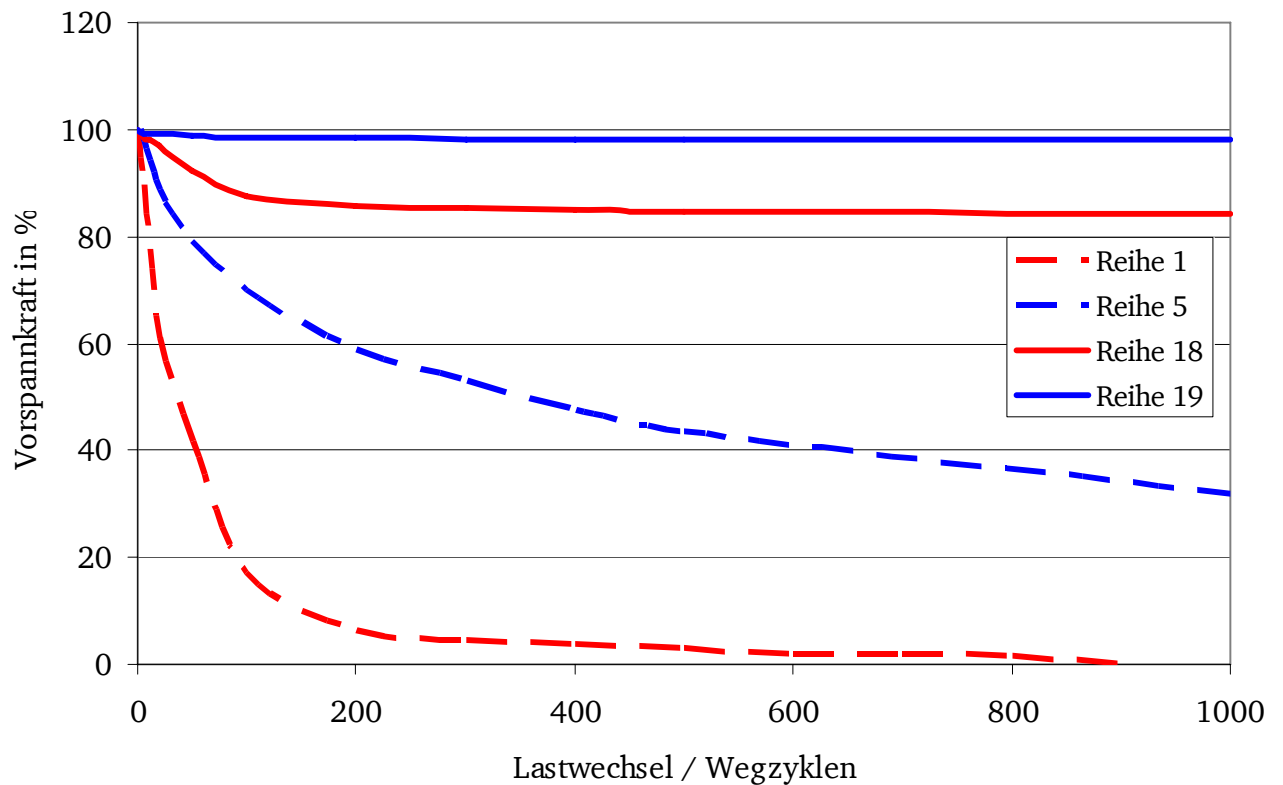


Bild 15: Zyklischer Zugversuch

#### 4.2.5 Einfluss der Schraubengröße

Mit den Versuchsreihen 20-23 werden unterschiedliche Schraubendurchmesser getestet (Reihe 1 M20, Reihe 20-21 M16 und Reihe 22-23 M24). Die Ergebnisse sind in Bild 16 dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen die Ergebnisse mit einer konstanten Klemmlänge von 40 mm dar. Gleichfarbige Linien sind Versuche mit gleicher Schraubengröße. Die gestrichelten Linien und die rote Linie sind Ergebnis von Versuchen mit einem Klemmlängen-Durchmesser-Verhältnis von  $l_k/d = 2$ .

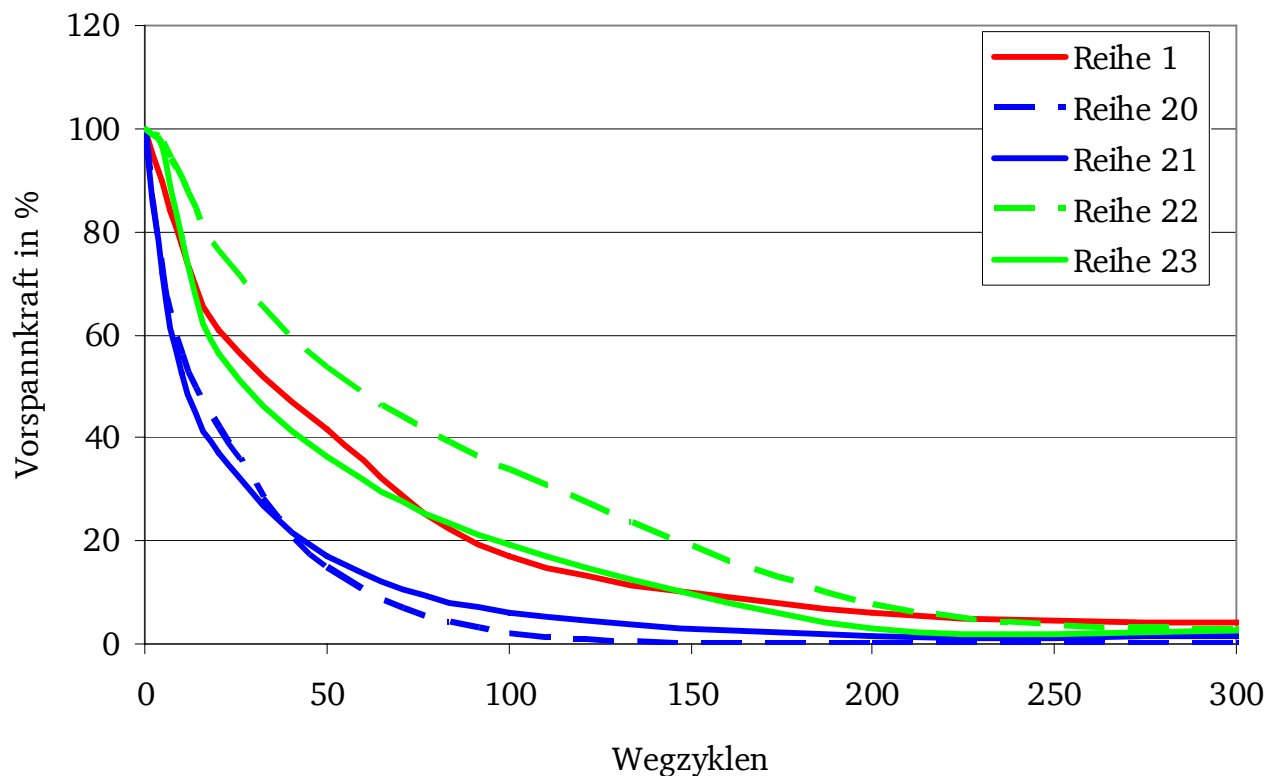


Bild 16: Einfluss der Schraubengröße

#### 4.2.6 Einfluss der Festigkeitsklasse

Mit den Reihen 24 und 25 wurden Schrauben M20 mit der Festigkeitsklasse 8.8 untersucht. Verglichen mit den Reihen 1 und 5 (M20 10.9) kann der Einfluss der Festigkeitsklasse bestimmt werden. In Bild 17 sind die Ergebnisse dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stehen für unterschiedliche Klemmlängen (rot  $l_k = 40$  mm; blau  $l_k = 100$  mm). Man erkennt, dass bei den Versuchen mit der niedrigeren Festigkeitsklasse die Vorspannkraft deutlich stärker abfällt.

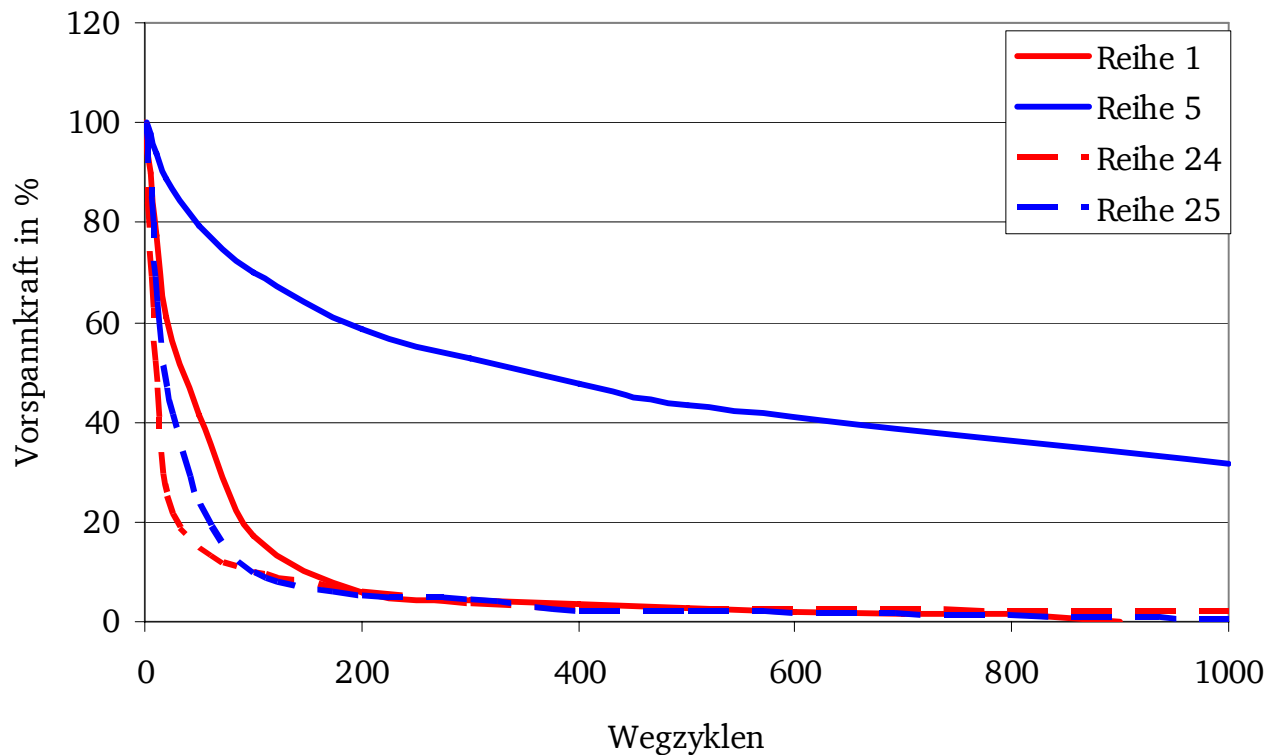


Bild 17: Einfluss der Schraubenfestigkeit

#### 4.2.7 Einfluss des Verschiebeweges

Mit den Versuchsreihen 26-28 wurden unterschiedliche Verschiebewege getestet. Die zyklische Verschiebung betrug:

Versuchsreihe 01	$\pm 2,0$ mm
Versuchsreihe 26	$\pm 1,0$ mm
Versuchsreihe 27	$\pm 0,5$ mm
Versuchsreihe 28	$\pm 0,3$ mm

In Bild 18 sind die Ergebnisse dargestellt. Man erkennt, dass bei einer Reduktion des Verschiebeweges die Vorspannkraft weniger schnell abfällt. Für die Verschiebung von  $\pm 0,3$  mm stellt sich ein horizontaler Verlauf ein, die Vorspannkraft scheint konstant zu bleiben.

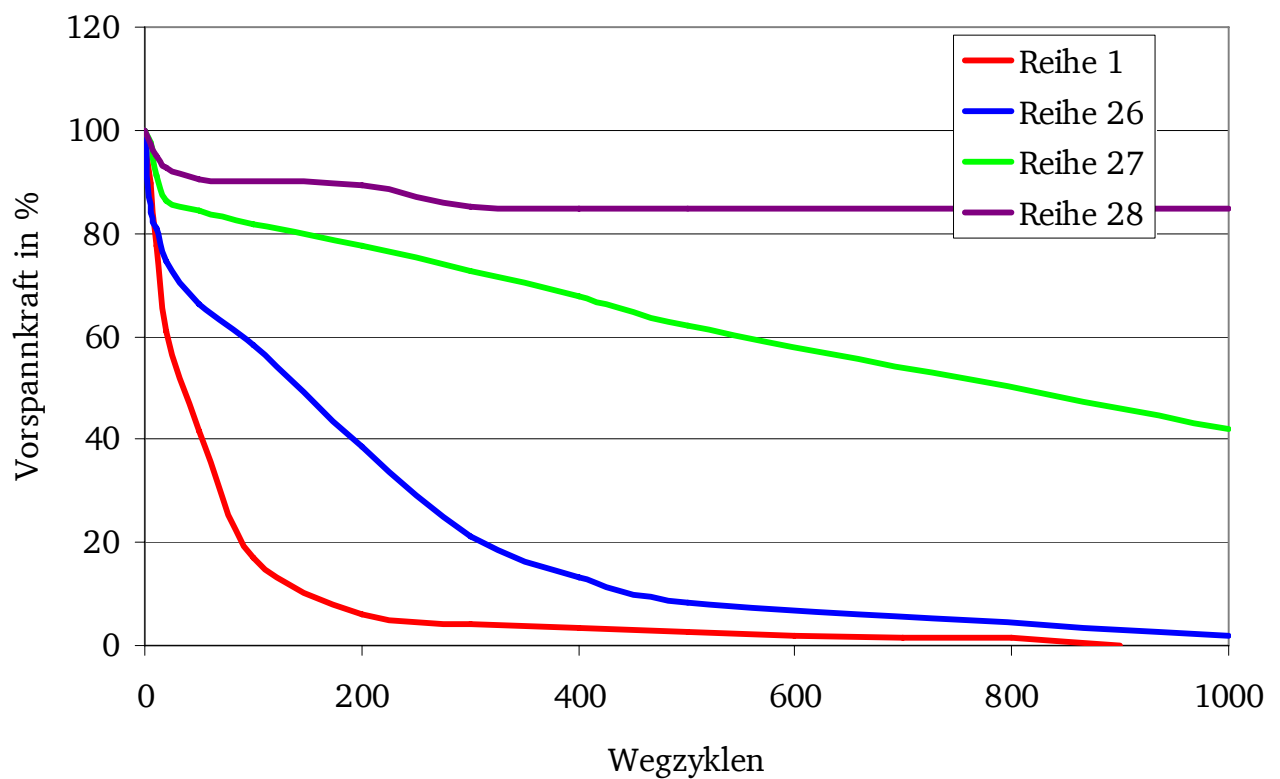


Bild 18: Einfluss des Verschiebeweges

#### 4.2.8 Einfluss der Vorspannung mit dem kombinierten Verfahren

Die Schrauben der Versuchsreihe 29 wurden mit dem kombinierten Verfahren vorgespannt. Daraus resultieren eine deutlich höhere Vorspannung in den Schrauben und eventuelle plastische Deformationen im Gewindebereich. Verglichen mit der Versuchsreihe 1 fällt die Vorspannkraft ähnlich schnell ab.

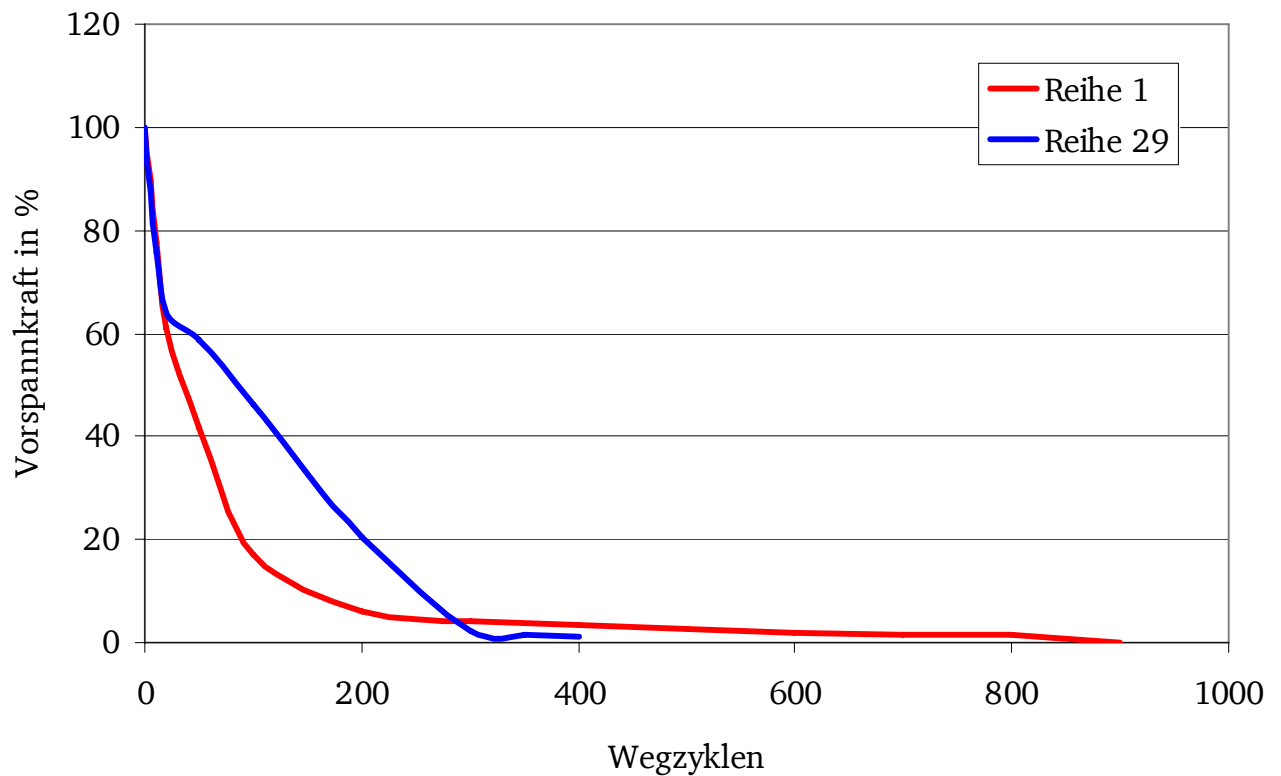


Bild 19: Einfluss bei Vorspannung mit dem kombinierten Verfahren

#### 4.2.9 Einfluss des Sicherungselementes NORD-LOCK

In den Versuchsreihen 30 und 31 wurde das Sicherungselement NORD-LOCK verwendet. Die Sicherungsscheiben werden anstelle der Unterlegscheiben platziert und sollen ein selbsttätiges Losdrehen durch Verriegelungszähne verhindern. Es wurden unterschiedliche Verschiebewege gefahren:

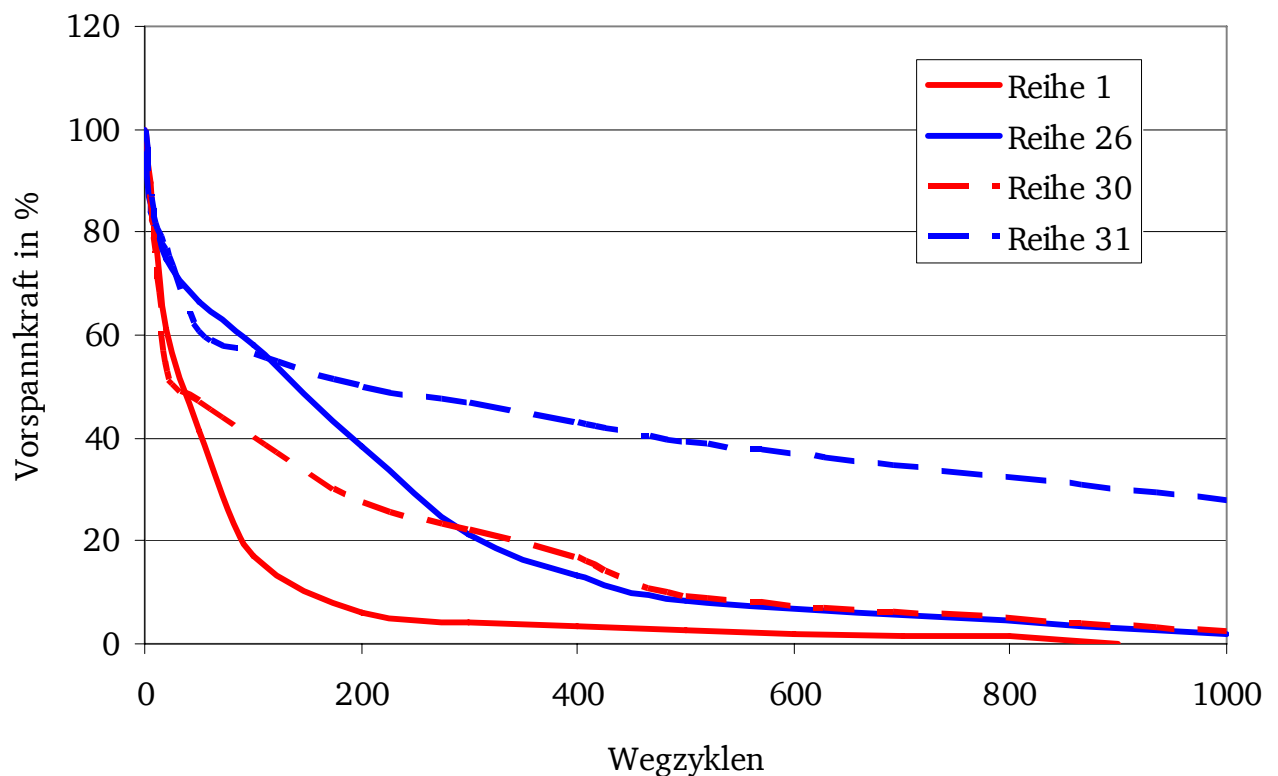
Versuchsreihe 01       $\pm 2,0$  mm

Versuchsreihe 26       $\pm 1,0$  mm

Versuchsreihe 30       $\pm 2,0$  mm

Versuchsreihe 31       $\pm 1,0$  mm

In Bild 20 sind die Ergebnisse dargestellt. Die durchgezogenen Kurven gehören zu den ungesicherten Verbindungen, die gestrichelten zu den mit NORD-LOCK gesicherten Verbindungen. Gleichfarbige Kurven haben den gleichen Verschiebeweg. Man erkennt, dass die Vorspannkraft der mit NORD-LOCK gesicherten Verbindungen ähnlich schnell abfällt. Die Verringerung des Verschiebeweges hat einen günstigen Einfluss. Bei Versuchsreihe 31 ist auch nach 1000 Wegzyklen eine relevante Vorspannkraft vorhanden.



**Bild 20:** Einfluss bei Verwendung des Sicherungselementes NORD-LOCK

Während den Versuchen 30 und 31 war deutlich zu erkennen, dass zwischen den Sicherungsscheiben ein Gleiten stattgefunden hat. Dort wird auch die Zinklamellenbeschichtung der Scheiben abgerieben. Der Vorspannkraftverlust im ersten Bereich resultiert definitiv nicht aus

dem Losdrehen, dieses konnte durch die Sicherungsscheiben verhindert werden. Erst als die Vorspannkraft schon deutlich reduziert war ( $<10\%$ ), konnten auch bei den gesicherten Verbindungen Losdrehprozesse (Springen der Zähne) beobachtet werden.

#### 4.2.10 Einfluss von Futterblechen

In den Versuchsreihen 32 und 33 wurde die Klemmlänge (60 und 100 mm) durch nicht befestigte Futterbleche erreicht. Die Grundbleche hatten mit je 20 mm eine konstante Dicke. Die zusätzlichen Bleche (je 10 und 30 mm) wurden einfach angelegt. Es zeigte sich, dass in der Fuge Blech – Futterblech kein Gleiten aufgetreten ist. Die Gleitfuge war bei allen Versuchen zwischen Mutter und Blech oder zwischen Schraubenkopf und Blech.

In Bild 21 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse für die Verbindungen mit Futterblechen. Die gleichfarbigen Kurven stehen für die gleiche Klemmlänge (rot 60 mm, blau 100 mm). Man erkennt, dass die Vorspannkraftverläufe der Reihen mit gleicher Klemmlänge sehr ähnlich sind. Dies spiegelt auch die Beobachtung, kein Gleiten zwischen Blech und Futterblech, wider.

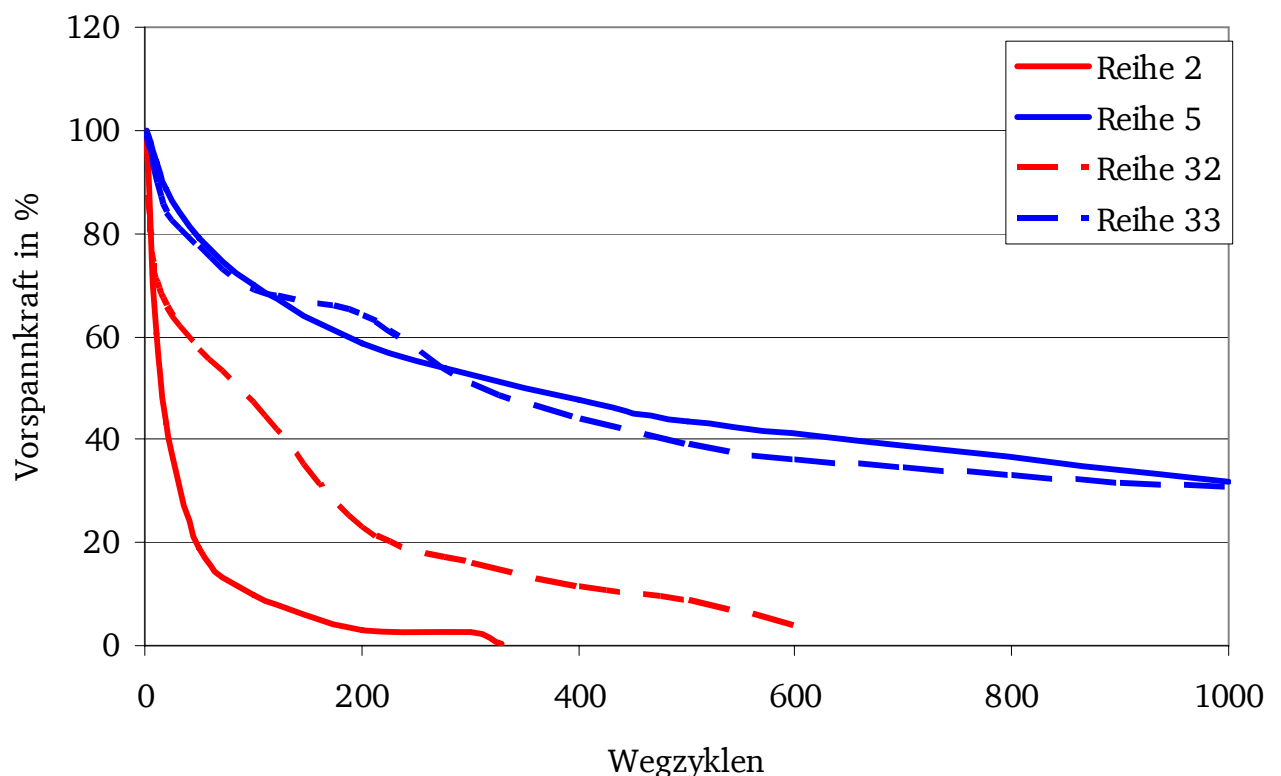


Bild 21: Einfluss von Futterblechen

---

### 4.3 Selbsttätiges Losdrehen und Setzen

Die im Kapitel 4.2 präsentierten Vorspannkraftverluste resultieren aus einer Kombination aus Losdrehen und Setzen. Eine genaue Differenzierung ist bei den durchgeführten Versuchen nur bedingt möglich. Ausgehend von den Versuchsbeobachtungen kann allgemein gesagt werden, dass bei den Versuchen im Regelfall erst ein reines Gleiten zwischen Schraubenmutter oder –kopf und der Unterlage aufgetreten ist. Erst nachdem die Vorspannkraft bereits deutlich reduziert war, kam es auch zu einem Losdrehen. Im fortgeschrittenen Verlauf der Versuche war auch deutlich ein Kippen der Mutter bzw. des Schraubenkopfes zu sehen. Dieses Kippen führt zu deutlichen Bewegungen im Gewinde.

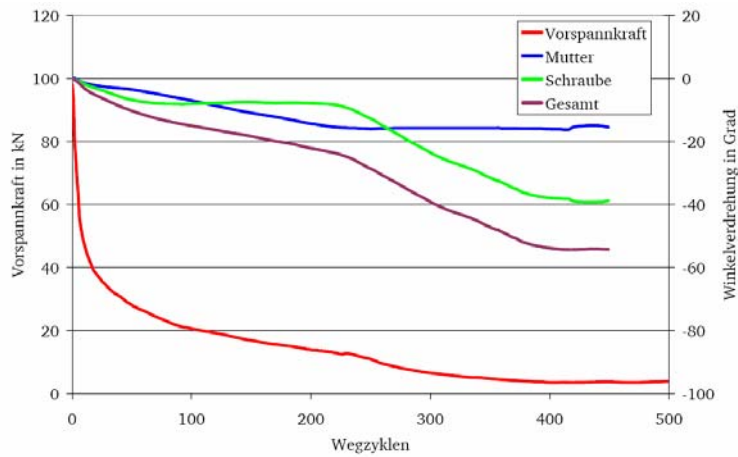
Das Losdrehen war meistens eine Kombination aus Muttern- und Schraubendrehen. Aus Fotos von der Schraube vor und nach den Versuchen konnte für einige Fälle ein Enddrehwinkel ermittelt werden. Tabelle 5 zeigt die ermittelten Enddrehwinkel. Es ist zu erkennen, dass die Enddrehwinkel der einzelnen Versuchsreihen eine ähnliche Größenordnung besitzen.

Bei der Durchführung der Versuche der Reihe 24 wurden an Schraubenkopf und Mutter Verdrehungsmesser angebracht. Dadurch konnte der Verlauf der Verdrehungen gemessen werden. Bild 22 bis Bild 24 zeigen die Ergebnisse. Dargestellt ist der Verlauf der Vorspannkraft über den Wegzyklen. Auf der rechten Vertikalachse sind die Winkelverdrehungen der Schraube, der Mutter und die Gesamtverdrehung dargestellt. Man erkennt einen deutlichen Zusammenhang zwischen Verdrehung und den einzelnen Vorspannkraftverlusten, dargestellt im Anhang A.

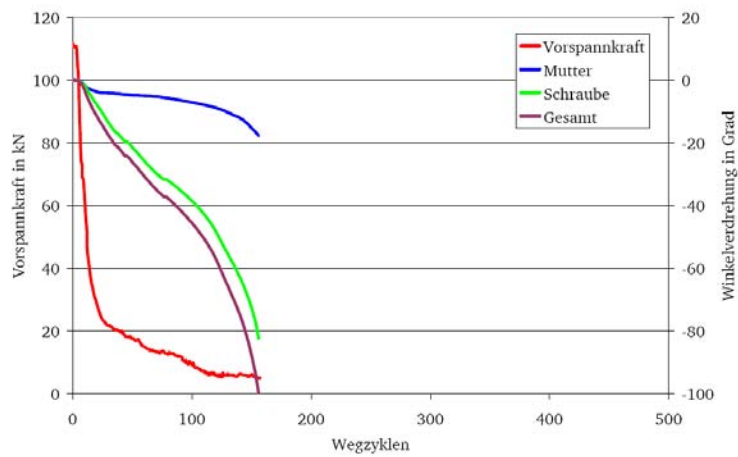
Tabelle 5: Enddrehwinkel der Versuche

Versuchsreihe		Verdrehung in Grad		
		Mutter	Schraube	Gesamt
1	1n	-30	-50	-80
1	2n	-30	-5	-35
1	3n	-30	-90	-120
4	2	-30	-10	-40
4	3	-10	-10	-20
6	3	-5	0	-5
7	2	-100	-80	-180
7	3	-50	-100	-150
8	3	20	-90	-70
9	1	-10	-80	-90
9	2	-80	-45	-125
10	1	0	-45	-45
10	3	-10	-50	-60
11	2	-100	10	-90
11	3	-40	-50	-90
12	1	-20	-45	-65
12	2	-20	-20	-40
13	2	-40	-10	-50
13	3	-45	-10	-55
14	2	-75	-20	-95
15	1	-100	-50	-150
16	1	-50	-40	-90
16	2	-50	-50	-100
16	3	-90	-30	-120
17	1	0	0	0
17	2	0	0	0
17	3	-10	0	-10
18	1	0	0	0
18	2	0	0	0
18	3	0	0	0
19	1	0	0	0
19	2	0	0	0
19	3	0	0	0
20	1	-50	-40	-90
20	2	-45	-45	-90
20	3	-45	-40	-85

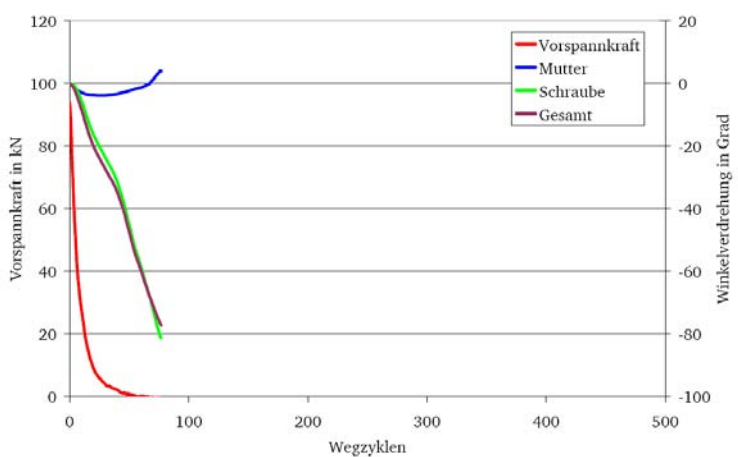
Versuchsreihe		Verdrehung in Grad		
		Mutter	Schraube	Gesamt
21	1	-45	-45	-90
21	2	-30	-30	-60
21	3	45	-135	-90
22	1	-100	-20	-120
22	2	-110	0	-110
22	3	-180	50	-130
23	1	-20	-50	-70
23	2	-80	-45	-125
23	3	-50	-40	-90
24	2	-30	-90	-120
24	3	0	-80	-80
25	1	0	-90	-90
25	2	0	-100	-100
25	3	-10	-60	-70
26	1	-30	-40	-70
26	2	-40	-45	-85
27	1	-30	-40	-70
27	2	-40	0	-40
28	1	0	0	0
28	3	0	0	0
29	1	-70	-20	-90
29	2	-30	-50	-80
29	3	-10	-50	-60
30	1	0	-50	-50
30	2	0	-30	-30
30	3	0	-30	-30
31	1	0	0	0
31	2	0	0	0
31	3	0	-10	-10
32	1	-40	-40	-80
32	2	-10	-45	-55
32	3	-10	-30	-40
33	1n	-20	-15	-35
33	2n	-10	-40	-50



**Bild 22: Vorspannkraftverlauf und Winkelverdrehung von Versuch 24-1**



**Bild 23: Vorspannkraftverlauf und Winkelverdrehung von Versuch 24-2**



**Bild 24: Vorspannkraftverlauf und Winkelverdrehung von Versuch 24-3**

#### 4.4 Vorspannkraften nach dem Anziehen

Alle Schrauben wurden mit einem kalibrierten Drehmomentenschlüssel vorgespannt. Bis auf die Versuchsreihen 29-31 wurden alle Schrauben mit dem nach DIN 18800-7 vorgegebenem Drehmoment angezogen (Reihe 29 kombiniertes Verfahren nach DIN 18800-7; Reihe 30-31 Drehmoment nach Zulassung NORD-LOCK). Bild 25 zeigt die Vorspannkraften direkt nach dem Anziehen. Die roten Linien zeigen die Regelvorspannkraften nach DIN18800-7 (Bereich (1) M20 8.8; Bereich (2) M20 10.9; Bereich (3) M24 10.9; Bereich (4) M16 10.9; Bereich (5) M20 10.9 kombiniertes Verfahren; Bereich (6) M20 10.9 NORD-LOCK). Man erkennt, dass für die Schrauben M16 und M20 die Regelvorspannkraft in vielen Fällen nicht erreicht wird. Die Schrauben M24 und die Schrauben M20, die mit dem kombinierten Verfahren vorgespannt wurden, übersteigen die Regelvorspannkraft deutlich. Die Zulassung für das NORD-LOCK Sicherungselement gilt nicht für planmäßig vorgespannte Verbindungen, so dass ein Vergleich mit der Regelvorspannkraft entfällt. Tabelle 6 zeigt das Anziehverfahren und die Mittelwerte für die sechs Kategorien.

Der verwendete Drehmomentenschlüssel wurde nach Durchführung der Versuchsreihen getestet. Die eingestellten Drehmomente wurden in dem Test erreicht.

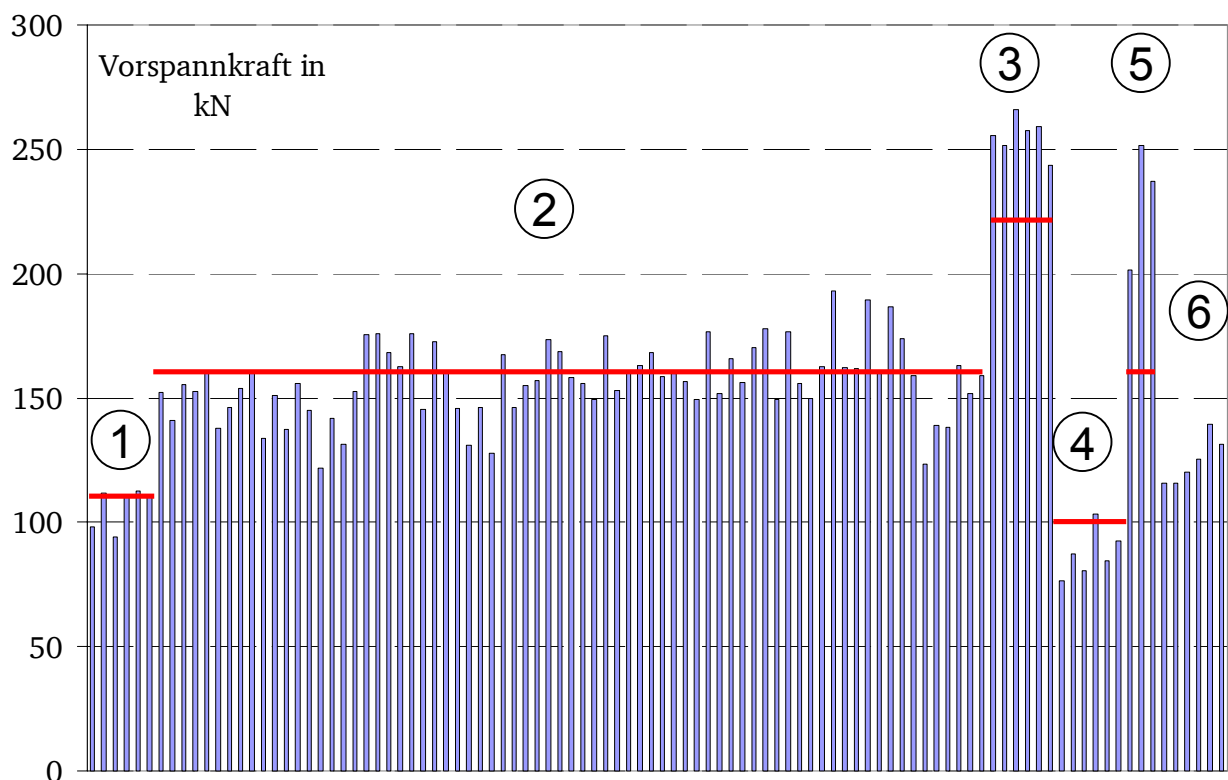


Bild 25: Vorspannkraften direkt nach dem Anziehen

Bereich	Bezeichnung	Anziehverfahren	Vorspannkraft in kN	
			Soll (DIN18800-7)	Ist (Mittelwert)
1	M20 8.8	Drehmoment 300 Nm	110	106
2	M20 10.9	Drehmoment 450 Nm	160	157
3	M24 10.9	Drehmoment 800 Nm	220	255
4	M16 10.9	Drehmoment 250 Nm	100	87
5	M20 10.9	Kombiniertes Verfahren 340 Nm + 60°	160	230
6	M20 10.9 NORD-LOCK	Drehmoment 506 Nm	-	125

**Tabelle 6: Gegenüberstellung Regelvorspannkkräfte zu gemessenen Vorspannkkräften**

---

## 5 Interpretation der Ergebnisse

---

### 5.1 Einfluss der untersuchten Parameter

Im Rahmen der Versuche wurden unterschiedliche Parameter untersucht. Anhand der Vorspannkraft-Wegzyklen-Diagramme können die Auswirkungen der Parameter in drei Kategorien eingeteilt werden: günstiger, ungünstiger und keinen Einfluss. Dabei bedeutet „günstig“, dass die Vorspannkraft länger gehalten wird. Daraus ergibt sich die folgende Einteilung:

Günstiger Einfluss:

- Vergrößerung der Klemmlänge
- Verringerung des Verschiebeweges
- Verwendung von NORD-LOCK Sicherungselementen

Ungünstiger Einfluss:

- Schraubenfestigkeit 8.8 gegenüber 10.9
- Beschichtung der Bleche

Keinen Einfluss:

- Vorspannen mit dem Kombinierten Verfahren
- Andere Schraubendurchmesser
- Zusätzliche Zugkraft
- Verwendung von Futterblechen bei gleicher Klemmlänge

Im weiteren Verlauf des Unterkapitels wird detailliert auf die Einflüsse eingegangen.

#### 5.1.1 Klemmlängeneinfluss

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der gegebenen Versuchsanordnung bis zu einer Klemmlänge von 80 mm die Vorspannkraft sich innerhalb von ca. 200 Wegzyklen vollständig abbaut. Bei einer Vergrößerung der Klemmlänge auf 90 mm und darüber hinaus bleibt auch nach 1000 Wegzyklen eine nicht zu vernachlässigende Vorspannkraft in der Schraube erhalten. Das bedeutet, dass bei einer Verschiebung von  $\pm 2$  mm bei voll vorgespannten Schrauben M20 10.9 ein Klemmlängen-Durchmesser-Verhältnis von 4,5 das selbsttätige Losdrehen verhindert. Bei Betrachtung der Verschiebungen der Versuchsreihen fünf und sechs zeigt sich, dass keine Verschiebung zwischen Mutter oder Schraubenkopf und der Unterlage stattfindet. Durch die gesteigerte Klemmlänge ist die Biegesteifigkeit der Schraube soweit reduziert, dass die Rückstellkraft bei einer Verschiebung von  $\pm 2$  mm nicht zu einem Gleiten führt (siehe Grenzgleitung Kapitel 2.2.2).

Trotzdem ist der Verlust der Vorspannkraft deutlich: 40 bis 70 % der ursprünglichen Vorspannkraft. Diese Verringerung ist durch Setzprozesse zu erklären, die insbesondere durch das Gleiten in der Kontaktfläche der Bleche entstehen. Durch den Abrieb der Oberflächen der einzelnen

---

Teilflächen (Schraube, Unterlegscheiben, Mutter, Gewinde, Kontaktflächen der Bleche) kommt es zu diesen starken Setzverlusten.

Des weitern ist zu beachten, dass durch die Gleitungen und die Verbiegungen der Schraube eine planmäßige Biegung auftritt. Dieses zyklische Biegemoment kann zum Dauerbruch der Schraube führen (in Versuchen der Reihe 17 mit zusätzlicher Zugbeanspruchung nach 1000 Wegzyklen aufgetreten).

### **5.1.2 Einfluss der Beschichtung**

Der Vergleich der Reihen 7 bis 12 (beschichtete Bleche) mit den unbeschichteten Blechen der Reihe 1 bis 6 zeigt, dass die Vorspannkraft bei den Versuchen mit Beschichtung deutlich schneller abfällt. Bei keinem der Versuche mit Beschichtung ist nach 1000 Wegzyklen noch eine relevante Vorspannkraft in der Schraube vorhanden. Durch die zusätzliche Beschichtung verstärken sich Setzeffekte, die zum Abbau der Vorspannkraft führen.

### **5.1.3 Einfluss einer äußeren Zugkraft**

Die Ergebnisse der Versuchsreihen 13 bis 17 zeigen, dass eine zusätzliche äußere Kraft in Schraubenlängsrichtung keinen negativen Einfluss auf das Losdrehen hat. Es ist zu erwarten, dass eine äußere Zugkraft die Neigung zum Losdrehen sogar reduziert. Durch die Zugkraft wird die Pressung zwischen Schraubenkopf und Mutter und der Unterlage vergrößert. Dadurch steigt die Grenzgleitung.

In zwei von drei Versuchen der Reihe 17 kam es nach 1000 Wegzyklen zum Dauerbruch der Schraube. Dies resultiert aus planmäßiger Biegung in der Schraube durch Schiefstellung. Zusätzlich wird die Belastung durch die angreifende Zugkraft vergrößert.

### **5.1.4 Zyklischer Zugversuch**

Beim zyklischen Zugversuch trat kein selbsttätiges Losdrehen auf. Trotzdem reduzierte sich die Vorspannkraft: um 15% bei einer Klemmlänge von 40 mm und um 3% bei einer Klemmlänge von 100 mm. Der Vorspannkraftverlust lässt sich durch Setzerscheinungen erklären. Die Schraube mit der größeren Klemmlänge ist dehnweicher, so dass gleiche Setzbeträge zu geringeren Vorspannkraftverlusten führt (siehe auch Kapitel 5.2). In der Regel dauert es mehrere Stunden, bis Setzen abgeschlossen ist. Es wird davon ausgegangen, dass durch die zyklische Belastung mikroskopische Bewegungen stattfinden, wodurch die Effekte beschleunigt, wenn nicht sogar verstärkt werden.

### **5.1.5 Einfluss der Schraubengröße**

Die Unterschiede der Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Schraubengrößen sind relativ gering. Daher sind die Ergebnisse nur schwer zu interpretieren.

---

Bei gleichem Klemmlängen-Durchmesser-Verhältnis ( $l_k/d = 2$ ) liefern die größeren Schrauben bessere Ergebnisse. Vergleicht man die Enddrehwinkel aus Tabelle 5 zeigt sich, dass die Schrauben der Größe M24 eine deutlich größere Verdrehung aufweisen. Es wird vermutet, dass die höhere Anfangsvorspannkraft dabei eine maßgebende Rolle spielt.

Insgesamt scheint es, als ob die Schraubengröße keinen Einfluss auf das selbsttätige Losdrehen hat.

#### **5.1.6 Einfluss der Festigkeitsklasse**

Der Verlauf der Vorspannkraft bei den Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 ist gegenüber 10.9 deutlich schlechter. Bereits nach 150 Lastwechseln ist die Vorspannkraft unabhängig von der Klemmlänge abgebaut. Dies resultiert wahrscheinlich aus der geringeren Anfangsvorspannkraft, welche zu einer geringeren Anfangsdehnung der Schraube führt.

#### **5.1.7 Einfluss des Verschiebeweges**

Der Verschiebeweg hat einen deutlichen Einfluss auf die Vorspannkraft. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Reduktion des Verschiebeweges die Vorspannkraft deutlich langsamer abgebaut wird. Trotzdem ist erst bei einem Verschiebeweg kleiner als  $\pm 0,3$  mm das Losdrehen soweit ausgeschaltet, dass die Vorspannkraft auf einem hohen Niveau konstant bleibt.

Der Einfluss des Verschiebeweges auf das Losdrehen konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass eine Verringerung des Verschiebeweges zu einer Reduktion des selbsttätigen Losdrehens führt. Außerdem werden sich die zyklischen Setzungen verringern.

#### **5.1.8 Einfluss der Vorspannung mit dem kombinierten Verfahren**

Versuche mit Schrauben, die mit dem kombinierten Verfahren vorgespannt wurden, führten zu ähnlichen Ergebnissen wie Losdrehversuche mit Schrauben, die mit dem Drehmoment vorgespannt wurden. Ein Einfluss auf das Losdrehverhalten konnte trotz der deutlich höheren Vorspannkraft nicht festgestellt werden.

#### **5.1.9 Einfluss des Sicherungselementes NORD-LOCK**

Es wurden Versuche mit NORD-LOCK Sicherungsscheiben gefahren. Verglichen mit ungesicherten Versuchen liefern die NORD-LOCK Versuche bessere Ergebnisse. Trotzdem fällt die Vorspannkraft deutlich ab. Nur bei Versuchen mit reduziertem Verschiebeweg ( $\pm 1$  mm) ist nach 1000 Wegzyklen noch eine relevante Vorspannkraft vorhanden. Die Enddrehwinkel (Tabelle 5) zeigen, dass die Verbindungen mit NORD-LOCK Elementen sich bei einer Verschiebung von  $\pm 2$  mm trotzdem losdrehen. Dies erfolgt allerdings erst nachdem die Vorspannkraft durch Setzprozesse bereits deutlich reduziert war. Bei den Verbindungen mit NORD-LOCK Elementen

---

und einer Verschiebung von  $\pm 1$  mm findet kein Losdrehen statt. Nachteilig beim Einsatz der Sicherungsscheiben ist, dass durch zusätzliche Fugen die Größe der Setzungen ansteigt. Gleichzeitig ist die anfängliche Vorspannkraft geringer, als bei voll vorgespannten Verbindungen.

#### 5.1.10 Einfluss von Futterblechen

Die Klemmlänge wurde in den Versuchen im Regelfall durch die Verwendung von unterschiedlichen Blechdicken realisiert. Zusätzlich wurde untersucht, in wie weit nicht fixierte Futterbleche den Losdrehprozess beeinflussen. Es stellte sich heraus, dass sich zwischen den Futterblechen und der Unterlage keine Verschiebung einstellte. Die daraus resultierenden Vorspannkraftverläufe waren vergleichbar. Ein maßgebender Einfluss durch die Futterbleche konnte nicht festgestellt werden.

### 5.2 Setzverluste

Es gibt Versuchsreihen, bei denen bis 1000 Wegzyklen kein Losdrehen stattgefunden hat. Diese sind die Versuchsreihen 5, 6, 17, 18, 19, 28 und 31. Es scheint, als ob die verwendeten Kombinationen eine ausreichende Sicherheit gegen Selbsttätiges Losdrehen liefern. Trotzdem treten Vorspannkraftverluste auf. Diese Verluste resultieren aus Setzungen. Die Größe der Setzungen lassen sich durch die Schraubensteifigkeit berechnen. Tabelle 7 zeigt die Setzungen, berechnet aus den Setzverlusten ( $\Delta F_v$  siehe Anhang A) und der Schraubensteifigkeit, bestimmt aus dem relativ einfachen Ansatz  $C_s = EA/L$  (siehe Kapitel 2.3).

Die Setzungen sind mit einfacher Näherung ermittelt und dienen daher nur als grober Richtwert. Es zeigt sich, dass die Setzungen für jede einzelne Versuchsreihe ähnlich sind. Die Versuchsreihen 18 und 19 unterscheiden sich durch ihre axiale Belastung deutlich. Daher müssen sie separat betrachtet werden (siehe Kapitel 5.1.4).

Die Setzungen der querbelasteten Versuchsreihen resultieren aus einer Mischung aus statischen und zyklischen Setzerscheinungen. Bei einem Vergleich der Setzungen aus Tabelle 7, ist der Zusammenhang zwischen Verschiebung und Größe der Setzung erkennbar. Je größer die Verschiebungen, desto größer sind die Setzungen. Auffällig ist, dass die Versuche mit einer zusätzlichen axialen Zugkraft (Reihe Nr. 17) deutlich kleinere Setzungen aufweisen als die vergleichbare Reihe ohne Zugkraft (Reihe 6). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Flächenpressung zwischen den Blechen durch die äußere Beanspruchung entlastet wird, was die zyklischen Setzungen dieser Trennfuge verringert. In den übrigen Trennfugen wird die Flächenpressung vergrößert. Allerdings findet dort keine Bewegung statt, so dass keine zyklischen Setzungen auftreten.

**Tabelle 7: Setzungen**

Versuchsreihe	Versuch	Klemmlänge in cm	Setzverluste in kN	Steifigkeit in kN/cm	Setzung $\mu\text{m}$	Beschreibung der Versuchsreihe
5	1	10	125	6594	190	M20 10.9 +/- 2mm
5	2	10	80	6594	121	M20 10.9 +/- 2mm
5	3	10	100	6594	152	M20 10.9 +/- 2mm
6	1	12	65	5495	118	M20 10.9 +/- 2mm
6	2	12	60	5495	109	M20 10.9 +/- 2mm
6	3	12	20	5495	36	M20 10.9 +/- 2mm
17	1	12	20	5495	36	M20 10.9 +/- 2mm Zug
17	2	12	5	5495	9	M20 10.9 +/- 2mm Zug
17	3	12	35	5495	64	M20 10.9 +/- 2mm Zug
18	1	4	35	16485	21	zyklischer Zugversuch
18	2	4	20	16485	12	zyklischer Zugversuch
18	3	4	15	16485	9	zyklischer Zugversuch
19	1	10	2	6594	3	zyklischer Zugversuch
19	2	10	5	6594	8	zyklischer Zugversuch
19	3	10	3	6594	5	zyklischer Zugversuch
28	1	4	25	16485	15	M20 10.9 +/- 0,3 mm
28	3	4	30	16485	18	M20 10.9 +/- 0,3 mm
31	1	4	85	16485	52	M20 10.9 +/- 1mm NORD-LOCK
31	2	4	90	16485	55	M20 10.9 +/- 1mm NORD-LOCK
31	3	4	115	16485	70	M20 10.9 +/- 1mm NORD-LOCK

Bei den Versuchsreihen 28 und 31 ist der Verschiebeweg reduziert. Auch hier sind die Setzungen deutlich kleiner, da die zyklischen Setzbeträge durch den niedrigeren Verschiebeweg verringert werden. Beim Einsatz der NORD-LOCK Sicherungsscheiben wird die Zahl der Trennfugen vergrößert. Der Zinküberzug der Sicherungsscheiben wird im Versuch deutlich abgerieben.

### 5.3 Grenzgleitung

Eine der Ziele dieses Forschungsvorhabens ist die Untersuchung der Grenzgleitung. Ein Ansatz zur Berechnung der Grenzgleitung liefert Gleichung (1) aus Kapitel 2.2.2. Für Schrauben M20 ergibt sich für unterschiedliche Reibbeiwerte  $\mu$  folgende Grenzgleitung:

**Tabelle 8: Theoretische Grenzgleitung in mm nach Gl.(1) für unterschiedliche Eingangsparameter**

Klemmlänge $l_k$ in mm	40	60	80	90	100	120
Grenzgleitung in mm ( $\mu = 0,1$ )	0,05 (0,02)	0,16 (0,08)	0,39 (0,19)	0,55 (0,28)	0,76 (0,38)	1,31 (0,65)
Grenzgleitung in mm ( $\mu = 0,2$ )	0,10 (0,05)	0,33 (0,15)	0,78 (0,36)	1,10 (0,52)	1,52 (0,71)	2,62 (1,22)
Grenzgleitung in mm ( $\mu = 0,3$ )	0,15 (0,07)	0,49 (0,23)	1,16 (0,54)	1,66 (0,77)	2,27 (1,06)	3,93 (1,83)
Grenzgleitung in mm ( $\mu = 0,4$ )	0,19 (0,09)	0,65 (0,31)	1,55 (0,72)	2,21 (1,03)	3,03 (1,41)	5,24 (2,44)
Grenzgleitung in mm ( $\mu = 0,5$ )	0,24 (0,11)	0,82 (0,38)	1,94 (0,91)	2,76 (1,29)	3,79 (1,77)	6,55 (3,06)
Annahme: Vorspannkraft $F_v = 150$ kN; Werte in Klammern $F_v = 70$ kN						

---

Einen Vergleich der theoretischen mit der experimentell ermittelten Grenzgleitung liefert ein Blick auf die Versuchsergebnisse der Reihen 1-6. Bei Klemmlängen 100 und 120 mm tritt bei  $\pm 2$  mm kein Gleiten auf, bei 90 mm in nur einem Versuch. Daher scheint die Grenzgleitung von einer Schraubenverbindung M20 10.9 mit einer Klemmlänge von ca. 90 mm (Vorspannkraft  $\sim 150$  kN) bei  $a_{\text{exp}} = 2$  mm zu liegen.

Die Reibbedingungen in den einzelnen Fugen der Verbindung sind unklar. Allerdings ist durch die Schmierung der Mutter in der Trennfuge Mutter-Unterlegscheibe mit einem relativ geringen Reibbeiwert von  $\mu \approx 0,1$  zu rechnen. Selbst bei Stahl auf Stahl wird in der Regel ein Reibbeiwert von  $\mu \approx 0,2$  angenommen. Vergleicht man die theoretischen Werte  $a_{(1)} = 1,10$  (Tabelle 8) mit den experimentell ermittelten Werten  $a_{\text{exp}} = 2$  mm, zeigt sich, dass die Gleichung (1) deutlich kleinere Werte für die Grenzgleitung liefert.

Will man die theoretische Grenzgleitung nach Gleichung (2) unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten der Randeinspannungen ermitteln, ist die Größe der Dreheinspannung des Schraubenkopfes bzw. der Mutter unbekannt. Um die experimentell ermittelte Grenzgleitung zu erreichen  $a_{(2)} = 2,0$  mm ( $F_v = 150$  kN,  $l_k = 90$  mm, Grenzgleitung  $\pm 2$  mm) ergibt sich für den Reibbeiwert  $\mu = 0,2$  eine Steifigkeit von  $C_\phi = 1300$  kN/rad.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bieten die Versuche der Reihen 26 bis 28. Bei den Versuchen mit Schrauben M20 10.9 und einer Klemmlänge von 40 mm wird der Verschiebeweg reduziert. Dabei zeigt sich eine Reduktion der Verschiebung von kleiner gleich  $\pm 0,3$  mm als ausreichend. Für die gegebenen Parameter (M20,  $l_k = 40$  mm,  $F_v = 150$  kN,  $\mu = 0,2$ ) liefert die theoretische Grenzgleitung nach Gleichung (1) eine Grenzgleitung von 0,1 mm. Unter Berücksichtigung der Einspannsteifigkeit nach Gleichung (2) ist für eine Grenzgleitung von 0,3 mm eine Kopfsteifigkeit von 1200 kN/rad notwendig.

Die Betrachtung zeigt, dass die Grenzgleitung nach Gleichung (1) zu konservative Werte liefert. Werden die Kopfsteifigkeiten nach Gleichung (2) berücksichtigt, liefert eine Steifigkeit von  $C_\phi = 1250$  kN/rad für M20 gute Übereinstimmungen.

Interessant ist, dass bei keinem Versuch nach Reduktion der Vorspannkraft Gleiten von Schraubenkopf/Mutter nachträglich einsetzte. Entweder Gleiten fand von Anfang an statt oder gar nicht. Das lässt zwei Schlüsse zu: (1) die Höhe der Vorspannkraft hat eine nur untergeordnete Auswirkung auf die Grenzgleitung und (2) im Laufe des Versuches werden die Reibbedingungen zwischen Schraube/Mutter und Unterlage verändert, so dass der Reibbeiwert ansteigt.

Dass die Größe der Vorspannkraft keinen relevanten Einfluss auf die Grenzgleitung haben soll, kann an dieser Stelle verworfen werden. Der Anstieg des Reibbeiwertes im Laufe des Versuches lässt sich mit dem Anstieg der Adhäsionskräfte (siehe Kapitel 2.4.3) erklären. Es scheint, als ob der Anstieg des Reibbeiwertes den Rückgang der Vorspannkraft in allen Fällen kompensiert.

## 5.4 Vorspannkraften nach dem Anziehen

In Kapitel 4.4 werden die Vorspannkraften direkt nach dem Anziehen beschrieben. Auffällig ist, dass viele Vorspannkraften unter den durch die Norm geforderten Mindestwerten liegen. Dies kann drei Ursachen haben: (1) unsachgemäÙes Anziehen, (2) fehlerhafter Drehmomentenschlüssel, (3) ungeeignete Reibbedingungen im Gewinde.

Die Gründe (1) und (2) können weitgehend ausgeschlossen werden (der Drehmomentenschlüssel wurde nach Ablauf der Versuche an einer Torsionsmaschine getestet). Daher bleiben als mögliche Ursache ungeeignete Reibbedingungen im Gewinde. Dies kann zwei Ursachen haben: (1) falsch eingestellte Reibbedingungen bei der Fertigung und (2) Beeinflussung der Reibbedingungen durch Lagerung, Transport oder Vorbereitung. Insbesondere der Kalibriervorgang und das Präparieren der Schrauben mit den DMS kann durchaus eine Auswirkung auf die Reibbedingungen im Gewinde haben. Allerdings streuen die Anziehungsmomente innerhalb einer Schraubengruppe relativ wenig. Z.B. übersteigen alle Schrauben der Größe M24 die geforderte Vorspannkraft deutlich. Daher liegt der Verdacht nahe, dass bereits bei der Fertigung die Reibbedingungen nicht hinreichend genau eingestellt wurden.

Was der Grund für die niedrigen Vorspannkraften ist, bleibt an dieser Stelle ungeklärt. Es sei aber davor gewarnt, in der Planungsphase ohne weiteres eine volle Vorspannkraft rechnerisch anzusetzen. Um sicherzustellen, dass eine notwendige Vorspannkraft auch wirklich vorhanden ist, sind daher weiterführende Überlegungen (z.B. Verspannen mit dem kombinierten Verfahren, Vorspannkraftkontrollen, usw.) notwendig.

## 5.5 Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf andere Parameter

Die hier erzielten Ergebnisse gelten bzw. können nach Meinung des Verfassers auf unbeschichtete stahlbautypische Schraubenverbindungen der Größen M12 bis M36 und der Festigkeitsklasse 10.9 und höher übertragen werden.

Die hier präsentierten Ergebnisse passen sehr gut zu Versuchen an kleinen im Maschinenbau eingesetzten Schrauben M10, so dass grundlegende Abweichungen aufgrund der Größe nicht zu erwarten sind. Die Festigkeitsklasse 8.8 hat sich im Versuch nicht bewährt. Obwohl nur zwei Versuchsreihen eine scheinbar geringe Aussagekraft haben, war das Ergebnis ungenügend. Es scheint, dass Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 zu geringe Vorspannkraften liefern. Eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf größere Festigkeitsklassen ist daher problemlos möglich.

Die in den Versuchen untersuchte Epoxydharz-Beschichtung (Sollschichtdicke 80  $\mu\text{m}$ ) führte zu deutlich größeren Vorspannkraftverlusten. Dies ist auf zyklische Setzprozesse zurückzuführen. Eine Beschichtung wird sich im Regelfall negativ auswirken. Im Zweifelsfall ist die Setzneigung der Beschichtung vorab zu untersuchen.

---

## 6 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

---

### 6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens „Sichern von Schraubenverbindungen“ wurden am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt Vorspannkraftverluste von Schraubenverbindungen infolge von selbsttätigem Losdrehen untersucht. Ziel war es, konstruktive Lösungen für die sichere Gestaltung von HV-Schraubenverbindungen zu finden. Dafür wurden Versuche an einschnittigen Einschraubenverbindungen unter zyklischer Querverschiebung durchgeführt und ausgewertet. Abbruchkriterium der Versuche war der vollständige Verlust der Vorspannkraft oder maximal 1000 Zyklen.

Die untersuchten Parameter können nach ihrem Einfluss auf das selbsttätige Losdrehen bewertet werden. Dafür werden sie in drei Kategorien eingeordnet: Parameter mit einem günstigen (Vorspannkraftverluste sind kleiner), ungünstigen und keinen Einfluss.

Günstiger Einfluss:

- Vergrößerung der Klemmlänge
- Verringerung des Verschiebeweges
- Verwendung von NORD-LOCK Sicherungselementen

Ungünstiger Einfluss:

- Schraubenfestigkeit 8.8 gegenüber 10.9
- Beschichtete gegenüber unbeschichteten der Bleche

Keinen Einfluss:

- Vorspannen mit dem Kombinierten Verfahren
- Schraubendurchmesser
- Zusätzliche in Schraubenlängsrichtung gerichtete Zugkraft
- Verwendung von nicht fixierten Futterblechen bei gleicher Klemmlänge

Dabei ist zu beachten, dass die Vorspannkraft in allen Fällen mehr oder weniger stark reduziert wurde.

Im Laufe der Versuche zeigte sich, dass nur zwei Möglichkeiten das selbsttätige Losdrehen unter zyklischer Querverschiebung verhindern:

1. Vermeidung von Gleitungen zwischen Schraubenkopf/Mutter und der Unterlage
2. Verhinderung der gegenseitigen Verdrehung der Mutter und Schraube durch Formschluss

Um ein Gleiten zwischen Schraubenkopf und Mutter und der Unterlage zu vermeiden, wurden zwei Ansätze identifiziert: (1) Verringerung des Verschiebeweges und (2) Vergrößerung der Klemmlänge.

---

Bei HV-Schrauben der Größe M20, der Festigkeitsklasse von 10.9 und einer Klemmlänge von 40 mm, bedurfte es einer Verringerung des Verschiebeweges kleiner gleich  $\pm 0,3$  mm. Erst bei diesem relativ kleinen Verschiebeweg (Passschraube) konnte kein Losdrehen beobachtet werden. Bei HV-Schrauben der Größe M20, Festigkeitsklasse 10.9 und einer Verschiebung von  $\pm 2$  mm, bedurfte es einer Klemmlänge größer 90 mm ( $l_k/d \geq 4,5$ ), um selbsttätiges Losdrehen zu verhindern.

Um einen Formschluss der Schraube zu erreichen sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde nur das Sicherungselement NORD-LOCK Sicherungsscheibe untersucht. Dabei zeigte sich, dass auch hier der Verschiebeweg einen Einfluss auf die Wirkung der Sicherungsscheiben hat. Erst bei einem Verschiebeweg kleiner gleich  $\pm 1$  mm konnte der Vorspannkraftverlust effektiv verhindert werden.

Aus früheren Forschungsvorhaben ist Gleichung (1) zur Berechnung der Grenzgleitung bekannt. Sie beschreibt die maximal zulässige Gleitung zwischen den Blechen, bis es zum Rutschen der Schraube/Mutter und der Unterlage kommt. Es zeigte sich, dass die mit Gleichung (1) ermittelten deutlich geringer als die im Versuch aufgetretenen Werte sind. Eine Formel, die die Nachgiebigkeit der Einspannstelle berücksichtigt, Gleichung (2), liefert für den Ansatz der Steifigkeit von  $C_\varphi = 1250$  kN/rad für Schrauben M20 10.9 gute Übereinstimmungen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Vermeidung des Gleitens zwischen den Blechen das selbsttätige Losdrehen verhindert. Dies kann z.B. durch den Einsatz von GV-Verbindungen erreicht werden. In allen Versuchen mit zyklischer Querbewegung fand ein deutlicher Vorspannkraftverlust statt. Dieser wird teilweise auf das Losdrehen der Schraubenverbindung aber auch auf zyklische Setzeffekte zurückgeführt. Der Vorspannkraftverlust aufgrund von zyklischem Setzen ist deutlich und führt zusammen mit der Gefahr des Dauerbruchs bei Schraubenquerbiegung zu der Forderung, dass eine nachhaltige Schraubensicherung nur durch das Verhindern des Gleitens erreicht wird.

Beim Anziehen der Schrauben im Versuch zeigte sich, dass nicht alle Schrauben die geforderten Vorspannkraft nach DIN 18800-7 erreichten. Daher ist es erforderlich, dass zur Sicherstellung der vollen Vorspannkraft Maßnahmen (z.B. Anziehen mit dem kombinierten Verfahren) getroffen werden. Das Anziehen mit dem Drehmomentenverfahren nach DIN 18800-7 scheint nicht auszureichen.

Die Ergebnisse sind auf unbeschichtete, stahlbautypische Schraubenverbindungen der Größen M12 bis M36 und der Festigkeitsklasse 10.9 und größer übertragbar.

---

## 6.2 Forschungsbedarf

Nach Meinung der Verfasser gibt es zwei weitere Forschungsgebiete:

1. Effekt des Selbsttätigen Losdrehens
2. Sicherstellung der Vorspannkraft in HV-Verbindungen

Das erste Forschungsgebiet ist von eher wissenschaftlicher Bedeutung, da der Effekt des selbsttätigen Losdrehens immer noch nicht abschließend geklärt ist:

- Welche Auswirkungen haben die Mikrobewegungen im Gewinde?
- Welche Auswirkungen haben Gewindetoleranzen?
- Wie verändern sich die Reibbedingungen im Gewinde?
- Welche Auswirkungen hat der Zinküberzug im Gewinde?
- Welche Auswirkungen haben die Kippbewegungen zwischen Schraube und Mutter?
- Lässt sich das selbsttätige Losdrehen mit sinnvollem Aufwand modellieren?

Das zweite Forschungsgebiet hat eher baupraktische Bedeutung. Um zyklisch beanspruchte Schraubenverbindungen nachhaltig zu sichern, ist die Vermeidung von Gleitungen zwischen den verspannten Blechen elementar. Dafür muss die Sicherstellung der Vorspannkraft gewährleistet sein. Zukünftige Forschungsvorhaben können untersuchen:

- Welche bisher unbekanntes Setzeffekte gibt es?
- Entwicklung von verbesserten Montageverfahren, um höhere Vorspanngrade zu erreichen
- Entwicklung von verbesserten Schraubenmaterialien für höhere Vorspannkräfte
- Entwicklung von Kontrollmechanismen, um existierende Vorspannkräfte zu erfassen
- Entwicklung von einfachen Verfahren zur Erstellung von GV-Verbindungen

---

## 7 Literaturverzeichnis

---

- [1] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis „NORD-LOCK selbsthemmende Schraubensicherungscheiben“ 2008-05-07
- [2] Blume, D.; Illgner, K.H.: „Schrauben Vademekum“, Bauer & Schaurte Karcher, Neuss, 1988
- [3] DIN 18800-7 „Stahlbauten – Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation“, 11/2008
- [4] DIN 65151 „Luft- und Raumfahrt – Dynamische Prüfung des Sicherungsverhalten von Schraubenverbindungen unter Querbeanspruchung (Vibrationsprüfung)“, 8/2002
- [5] Esser, J.: „Sichern von Schraubenverbindungen aus der Sicht der Praxis“ DVM-Tag 2004 ‚Schraubenverbindungen‘ Berlin
- [6] Esser, J.; Hellwig, G.: „Konsequenzen für die Normung – Wirkungslose Schraubensicherungen“ DIN-Mitteilungen 4-2004
- [7] Junker, G.; Strelow, D.: „Untersuchungen über die Mechanik des selbsttätigen Lösens und die zweckmäßige Sicherung von Schraubenverbindungen“, Draht-Welt 52, 1966
- [8] Katzung, Pfeiffer, Schneider: „Zum Vorspannkraftabfall in planmäßig vorgespannten Schraubenverbindungen mit beschichteten Kontaktflächen“, Stahlbau 65, 1996, S. 307-311
- [9] Klöcker, M.; Hufschmidt, K.: „Einflussgrößen auf das selbsttätige Losdrehen von Schraubenverbindungen und praxisgerechte Prüfung“ DVM-Tag 2004 ‚Schraubenverbindungen‘ Berlin
- [10] Kloos, K.-H.; Thomala, W.: „Schraubenverbindungen – Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung“, Springer Verlag , 5. Auflage, 2007
- [11] Petersen, C.: „Stahlbau – Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten“ 3. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1997, ISBN 3-52-28837-X
- [12] Proff, S.: „Untersuchung des Setzverhaltens von hochfest vorgespannten Schraubenver-

- 
- bindungen unter zyklischer Beanspruchung“, Studienarbeit am IFSW der TU Darmstadt, 2007
- [13] Rutkowski, T., Schaumann, P.: „Dynamische Tragfähigkeit gleitfester Schraubenverbindungen in Gittermasten für Windenergieanlagen“, Abschlussbericht zum Entwicklungsprojekt IV des Niedersächsischen Forschungs- und Kompetenzzentrums Windenergie; Leibniz Universität Hannover, 2010
- [14] Strelow, D.: Merkblatt 302 ‚Sicherungen für Schraubenverbindungen‘, Beratungsstelle für Stahlanwendung, Düsseldorf, 1983
- [15] Thomala, W.: „Größere Sicherheit bei Schraubenverbindungen“, Draht-Welt 2, 1979
- [16] Valtinat, G.; Hasselmann, U.: „Geschraubte Verbindungen“, Stahlbau Kalender 2002, Ernst & Sohn

---

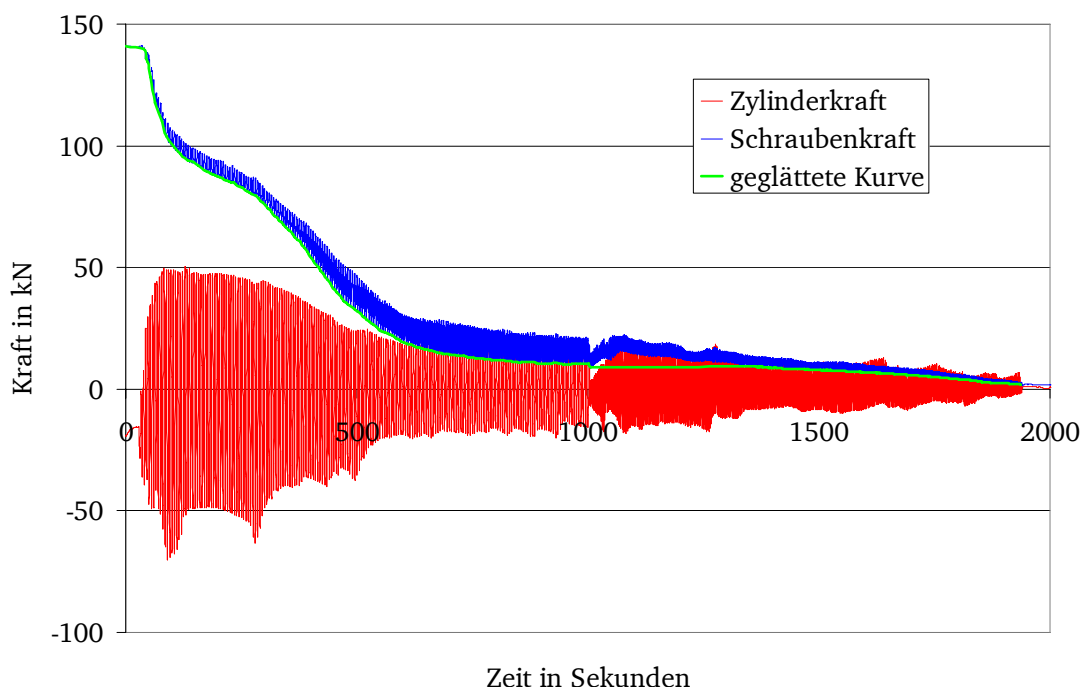
## Anhang A

---

Im Anhang A werden die Verläufe der Vorspannkraft über die Wegzyklen dargestellt. Dabei werden für alle Versuche die Absolutwerte und die auf den Anfangswert bezogenen Relativwerte aufgeführt. Nicht alle Versuche lieferten verwertbare Ergebnisse. Daher wurden Versuche wiederholt. Die neuen Versuche sind mit dem Index „n“ gekennzeichnet. Für jede Versuchsreihe gibt es mindestens zwei verwertbare Versuche. In den Diagrammen mit den Relativwerten sind Mittelwertkurven aufgeführt. Diese Kurven sind arithmetische Mittelwerte.

Die hier aufgeführten Vorspannkraftverläufe sind geglättete Kurven. Das Erstellen der Kurven soll exemplarisch erläutert werden. In Bild 1 sind die Rohdaten der Versuche dargestellt. Die Zylinderkraft wechselt regelmäßig vom Druck- in den Zugbereich um den Nullwert. Jede vollständige Amplitude steht für einen Wegzyklus. Die gemessene Schraubenkraft ist durch die blaue Linie dargestellt. Auch hier ist ein Schwingen um einen Mittelwert zu erkennen. Dieses Schwingen wird durch die Querkontraktion der Bleche erklärt. Die Minimalwerte der Schraubenkraft werden zu einer geglätteten Kurve zusammengefügt. Diese geglättete Kurve ist in den folgenden Diagrammen dargestellt.

Die Einschnürung bei ca. 1000 Sekunden wird durch die Vergrößerung der gefahrenen Versuchsfrequenz verursacht. Dadurch wird der Schubweg (weggesteuerte Versuche) kurzfristig reduziert.



**Bild 1: Exemplarische Darstellung der Rohdaten**

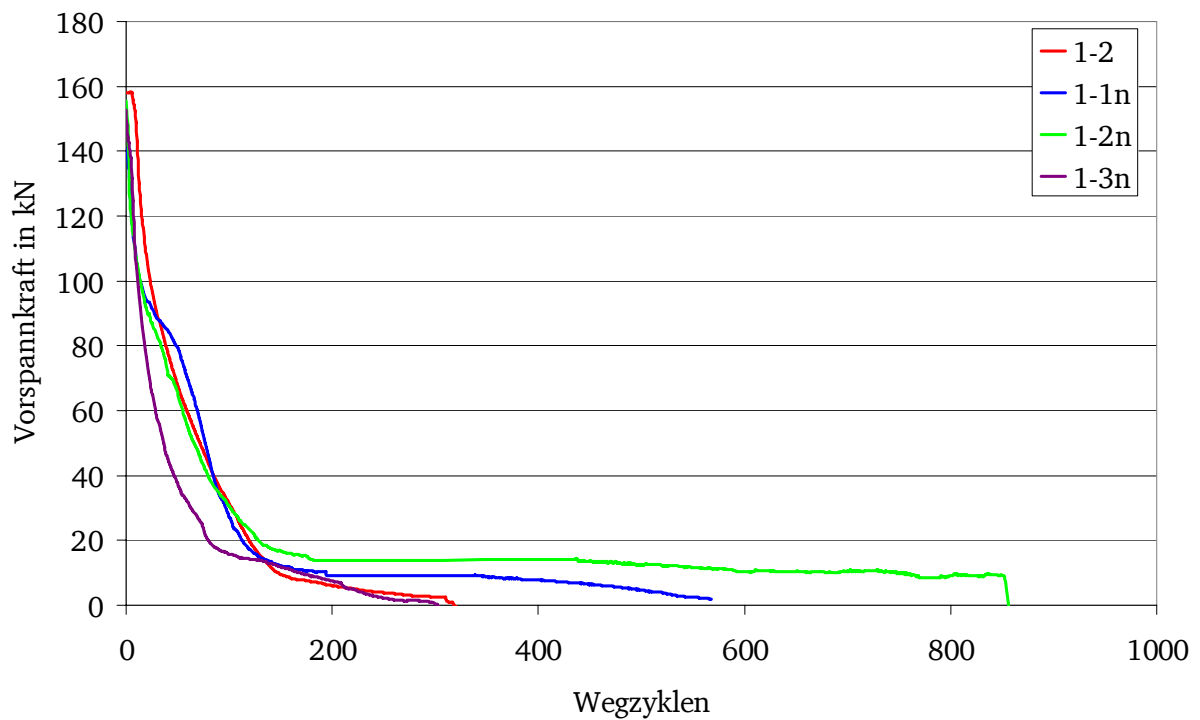


Bild 2: Versuchsergebnisse Reihe 1

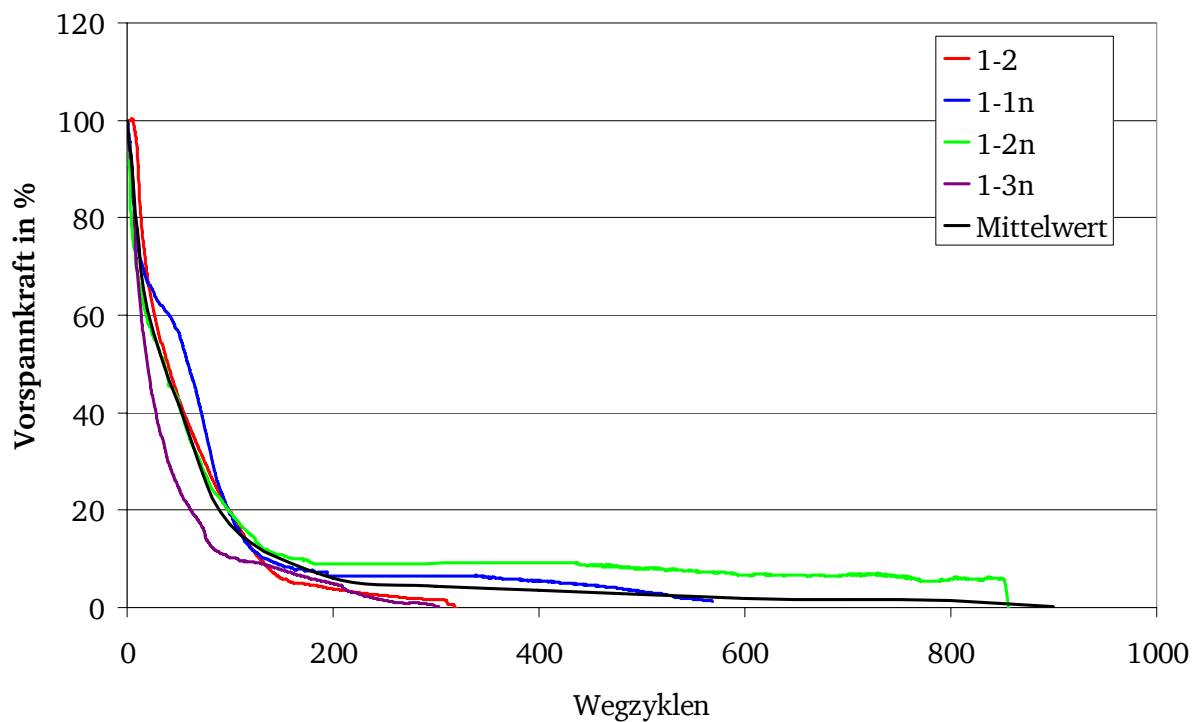
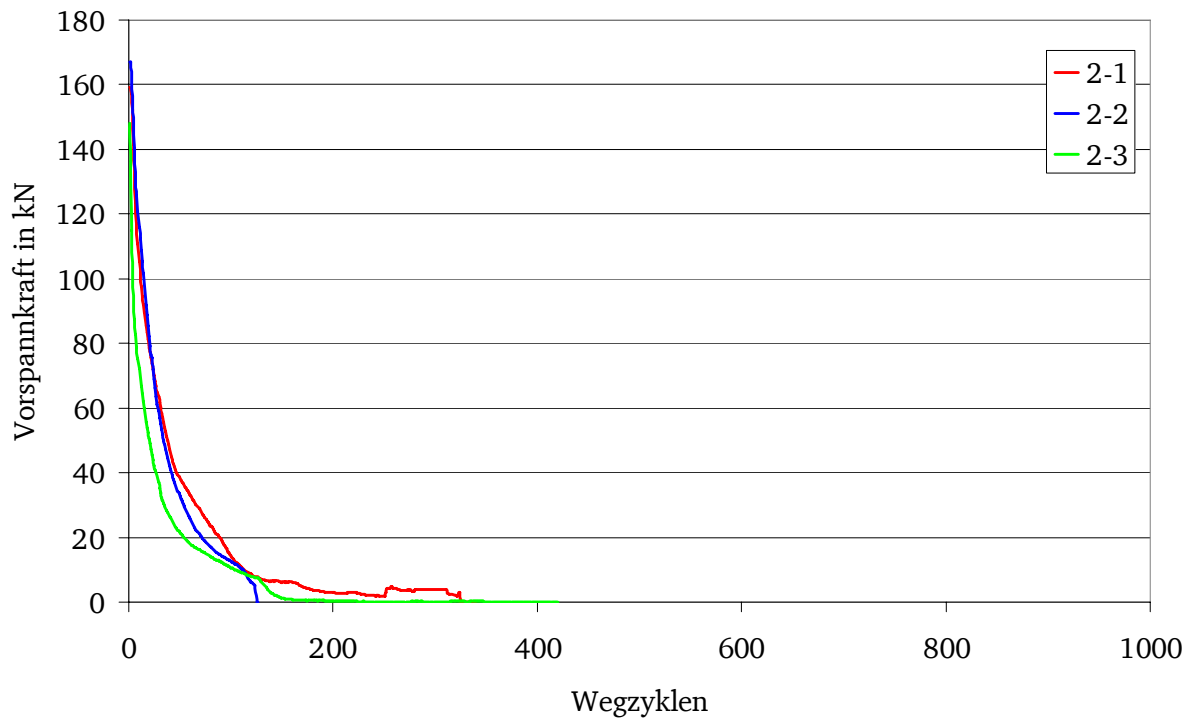
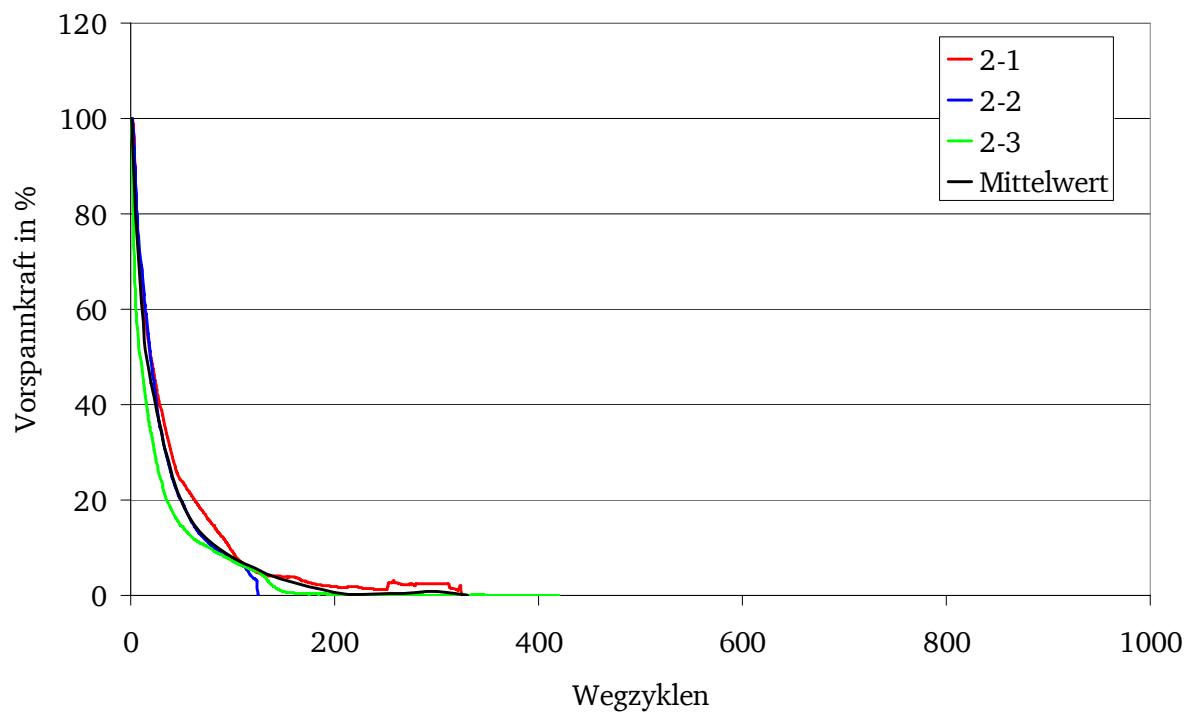


Bild 3: Versuchsergebnisse Reihe 1 in % der Anfangsvorspannkraft



**Bild 4: Versuchsergebnisse Reihe 2**



**Bild 5: Versuchsergebnisse Reihe 2 in % der Anfangsvorspannkraft**

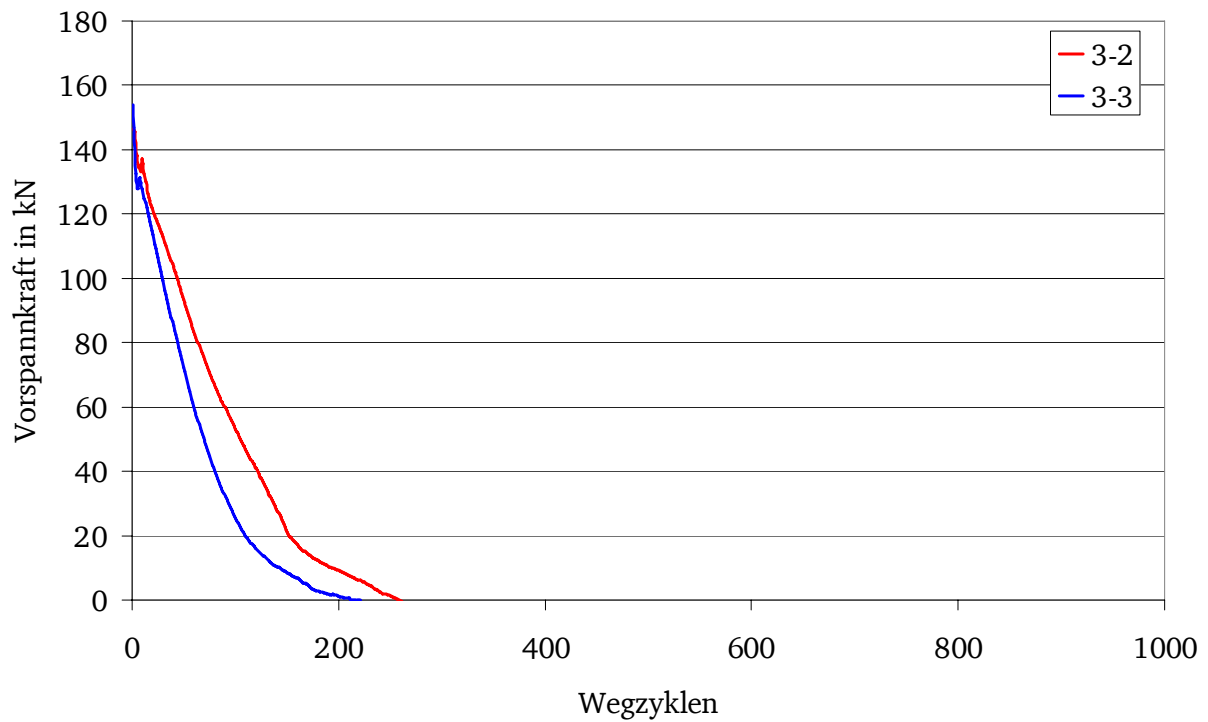


Bild 6: Versuchsergebnisse Reihe 3

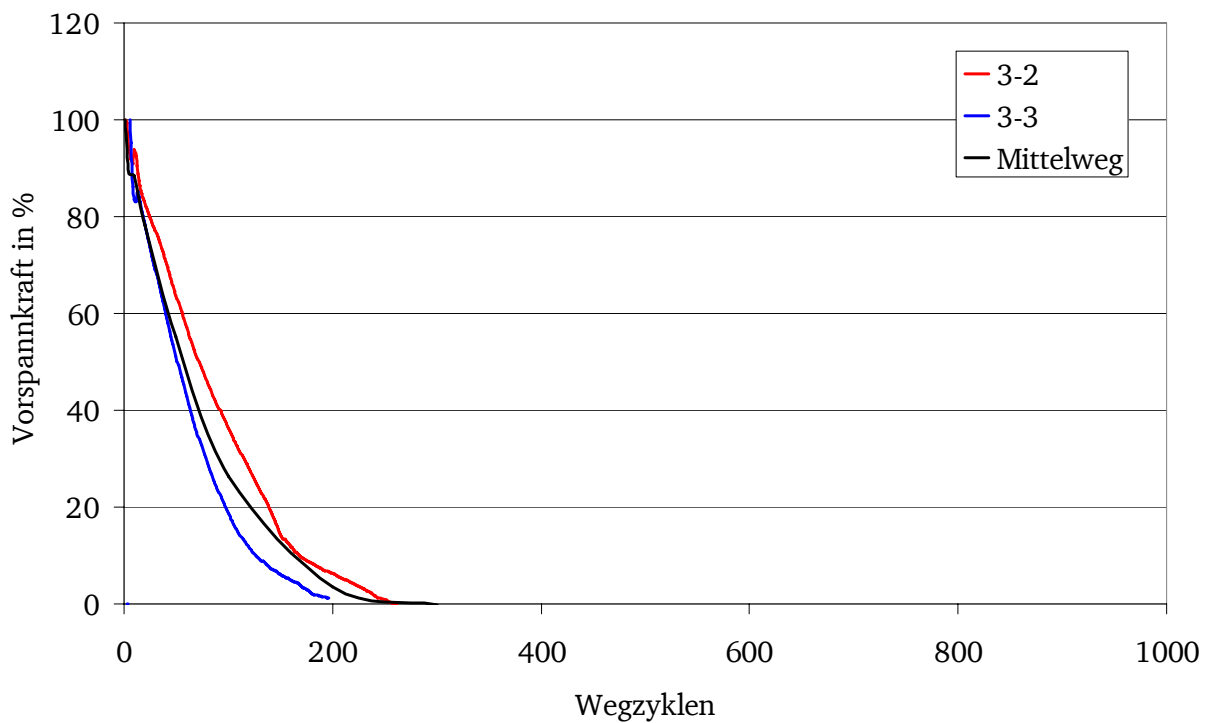


Bild 7: Versuchsergebnisse Reihe 3 in % der Anfangsvorspannkraft

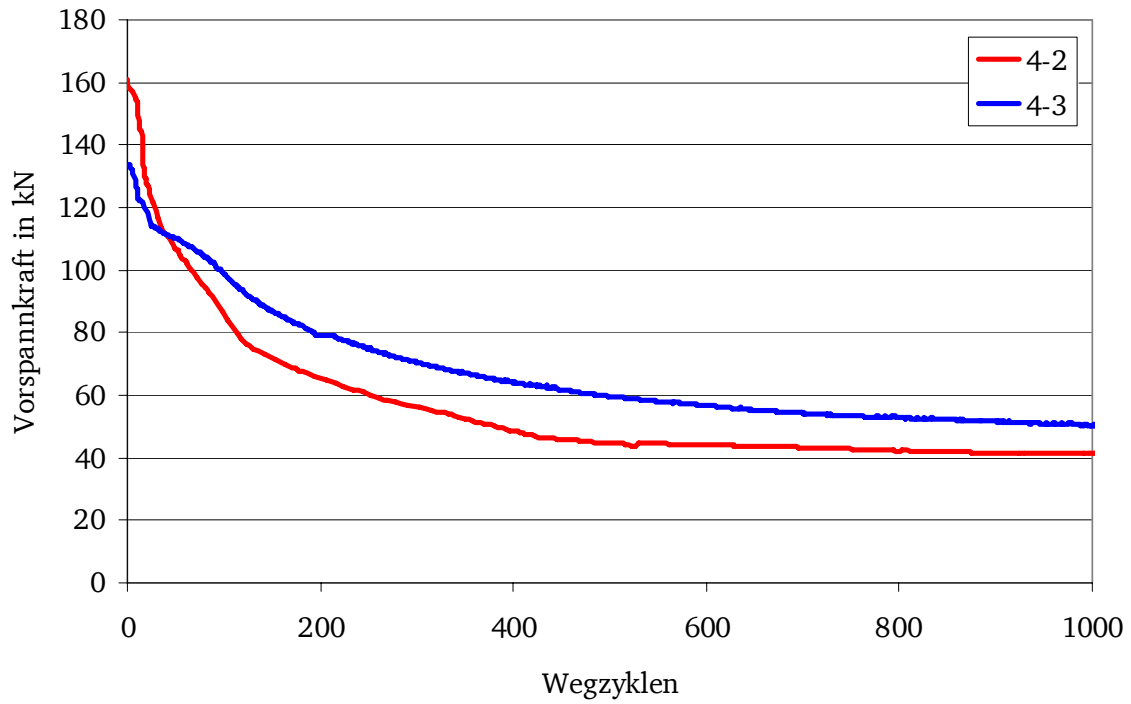


Bild 8: Versuchsergebnisse Reihe 4

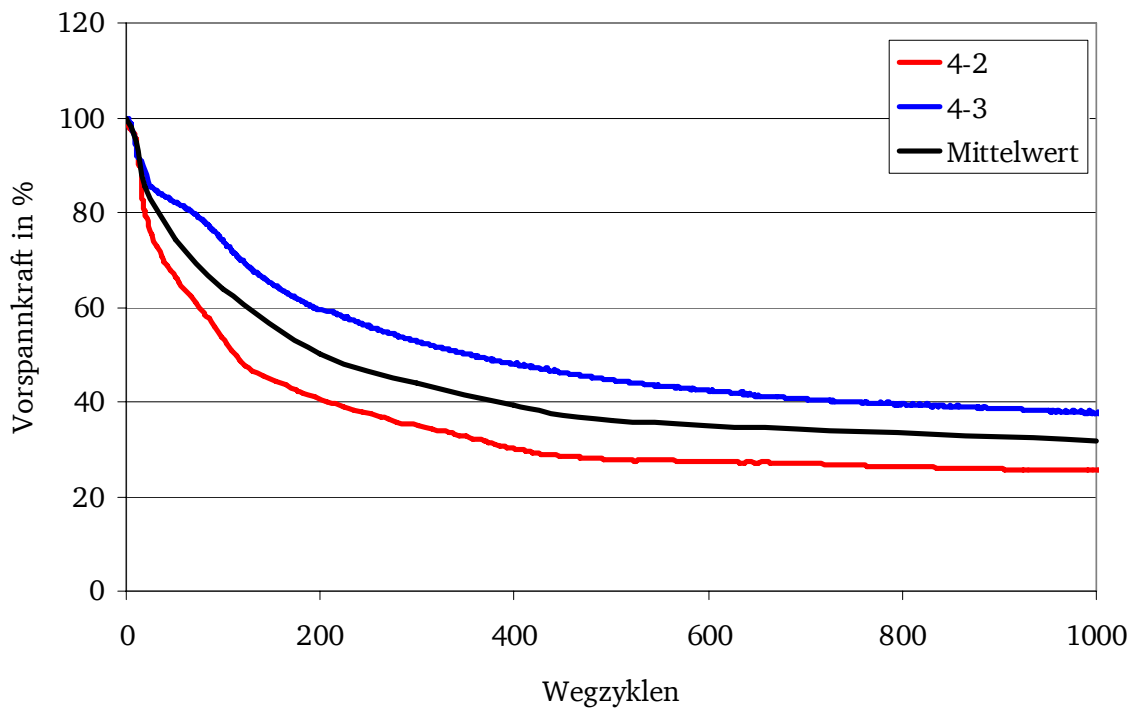


Bild 9: Versuchsergebnisse Reihe 4 in % der Anfangsvorspannkraft

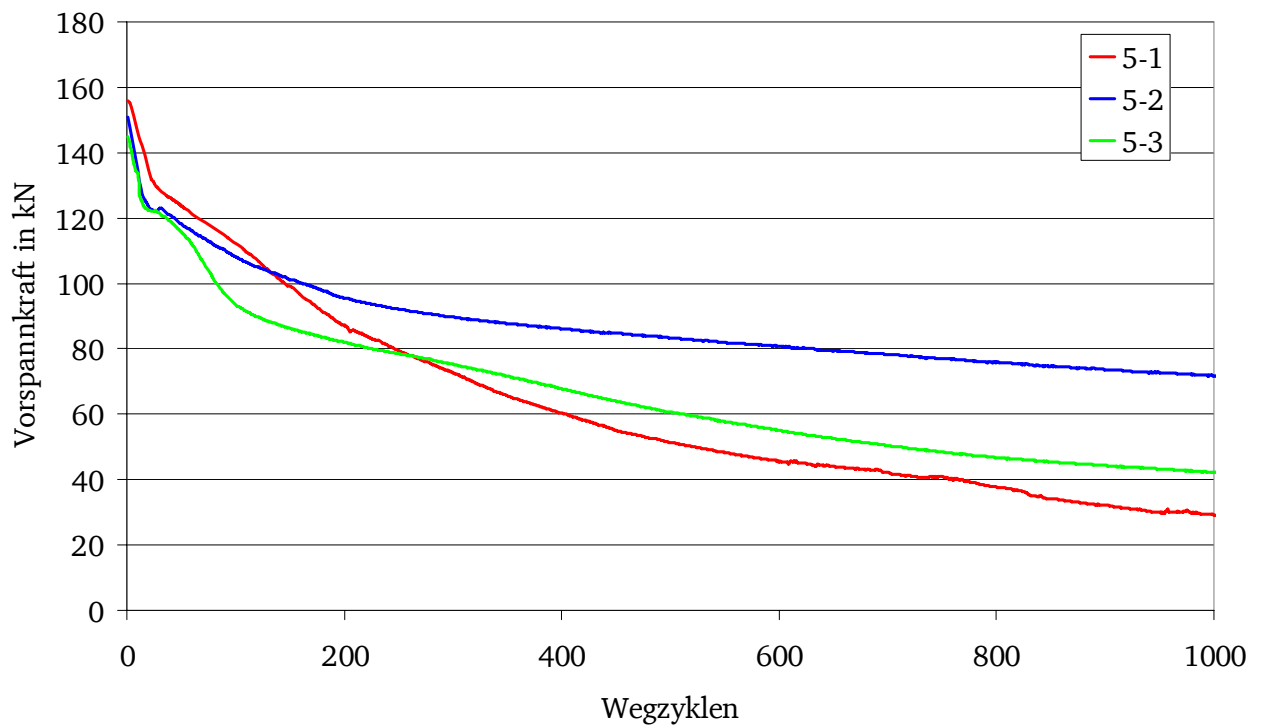


Bild 10: Versuchsergebnisse Reihe 5

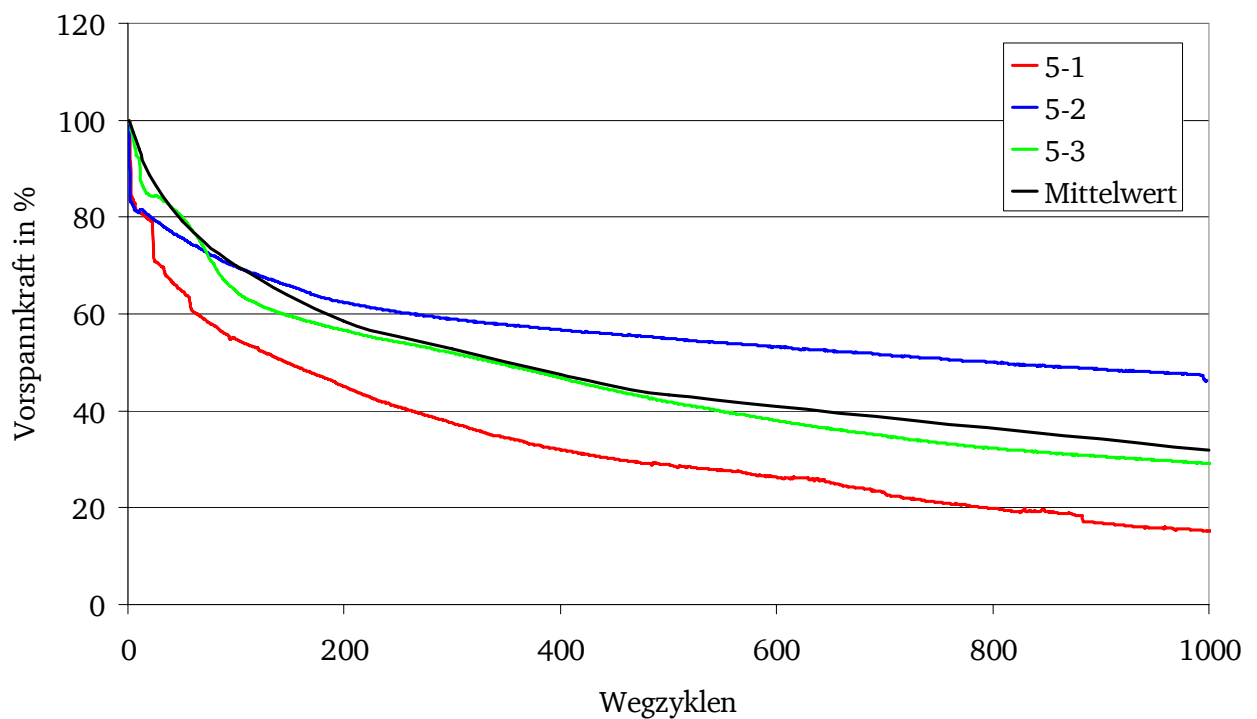


Bild 11: Versuchsergebnisse Reihe 5 in % der Anfangsvorspannkraft

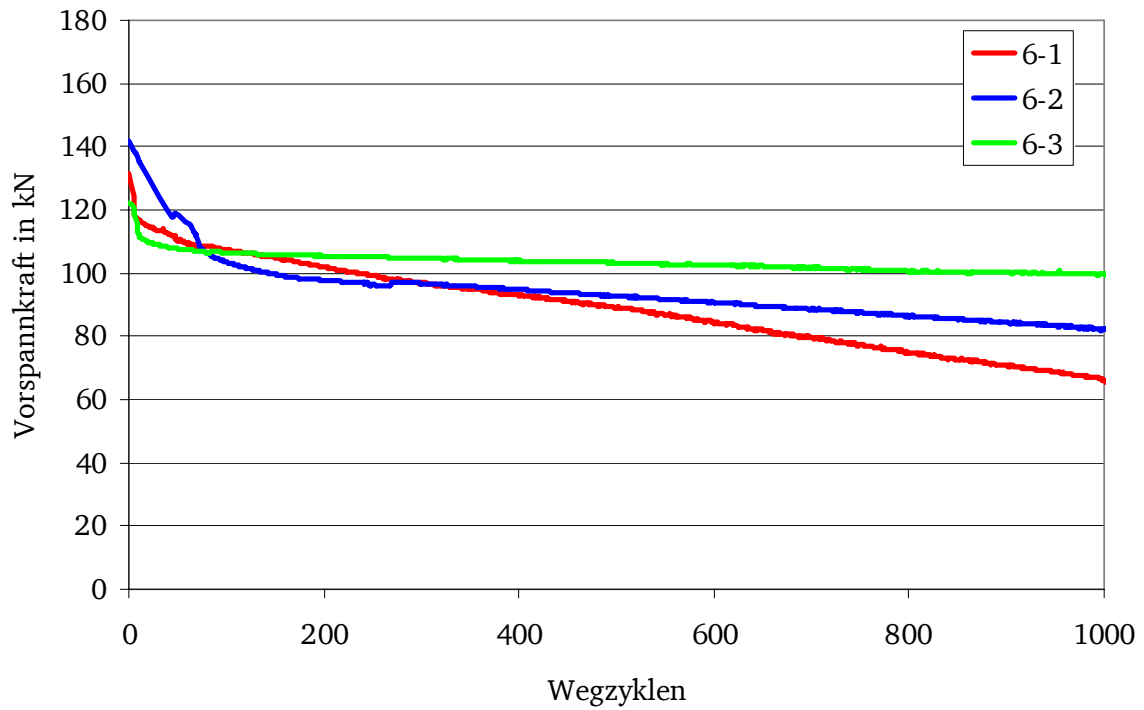


Bild 12: Versuchsergebnisse Reihe 6

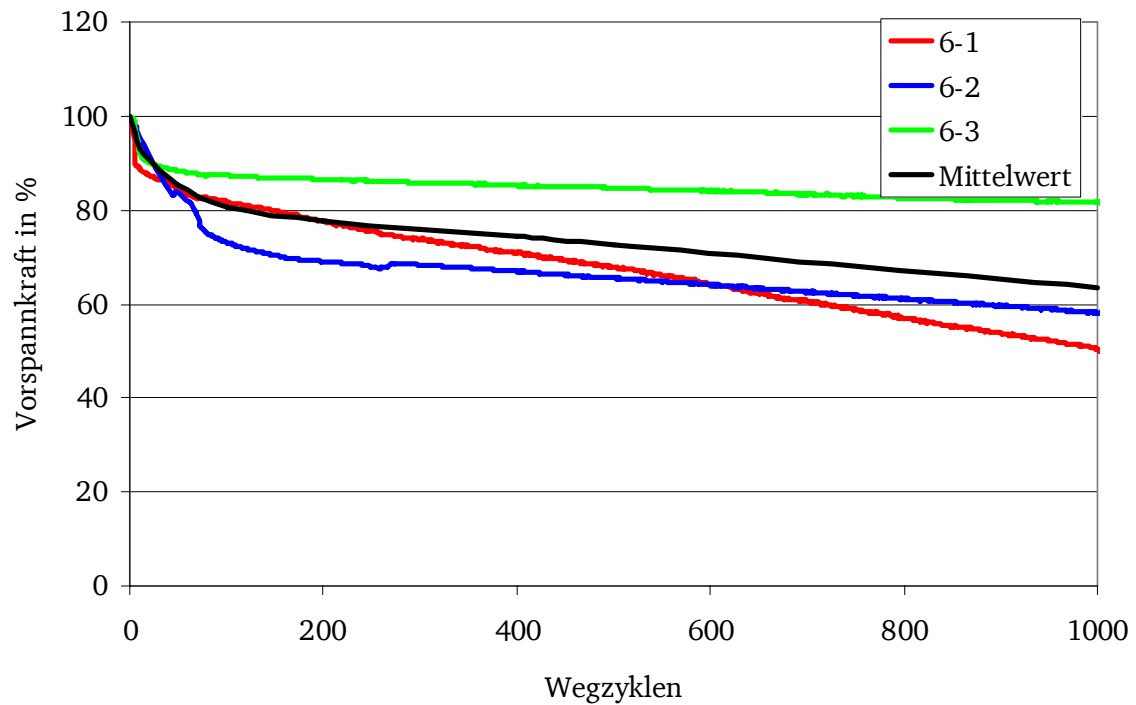


Bild 13: Versuchsergebnisse Reihe 6 in % der Anfangsvorspannkraft

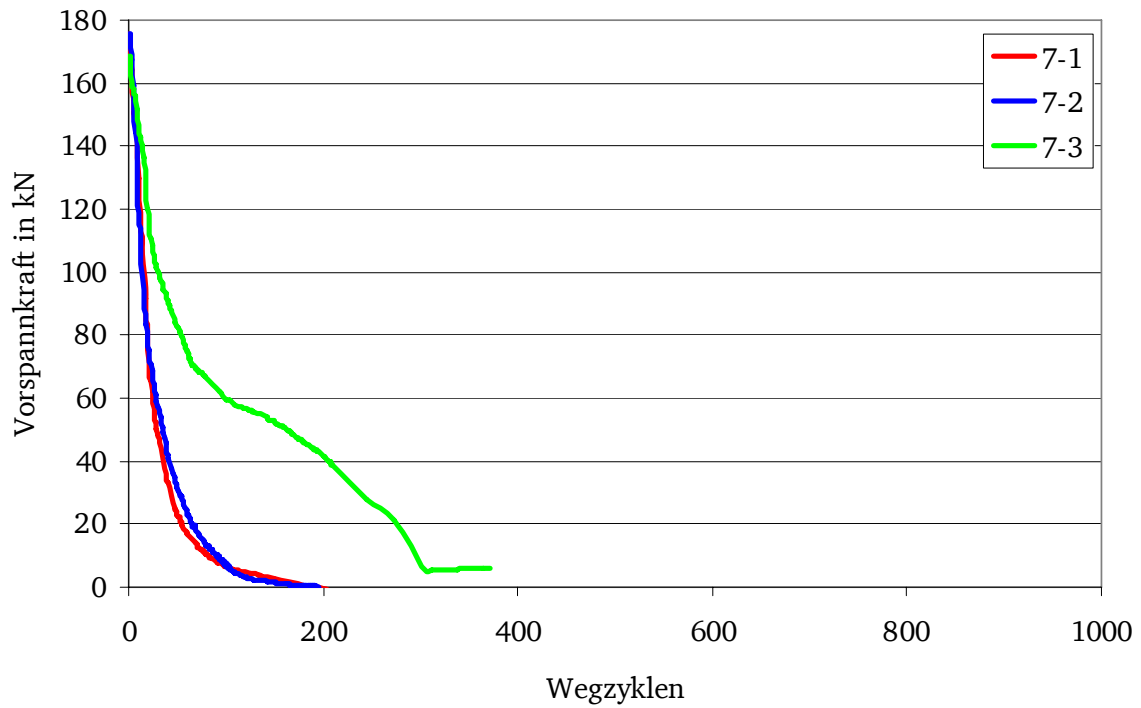


Bild 14: Versuchsergebnisse Reihe 7

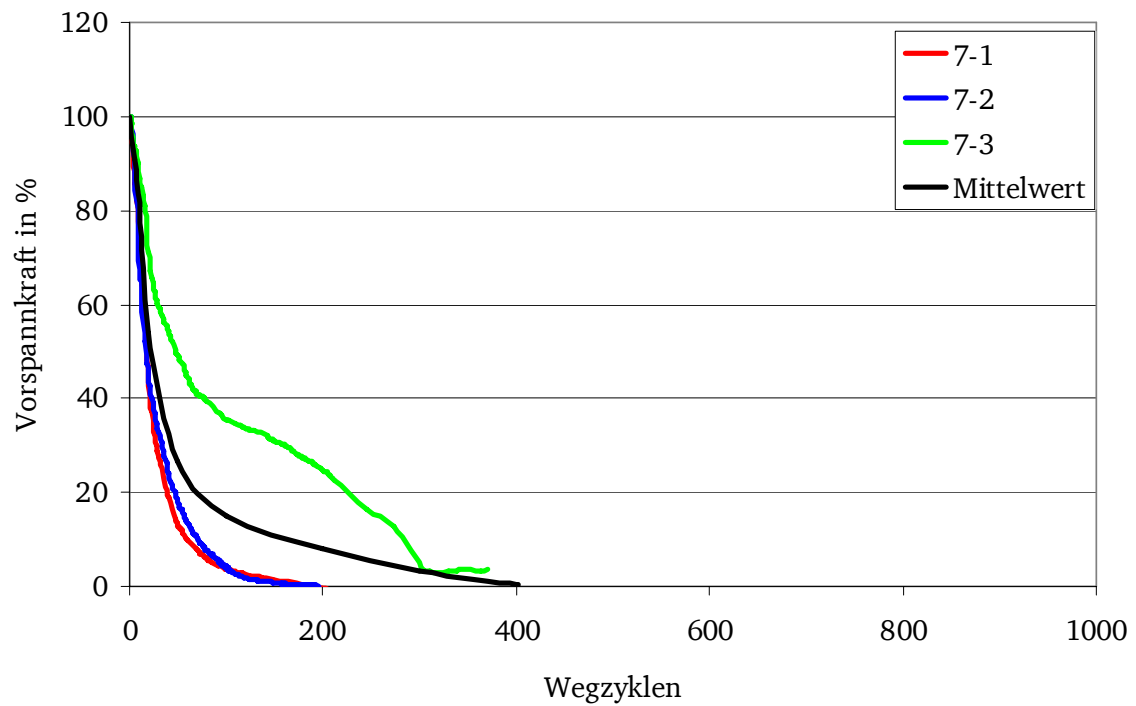


Bild 15: Versuchsergebnisse Reihe 7 in % der Anfangsvorspannkraft

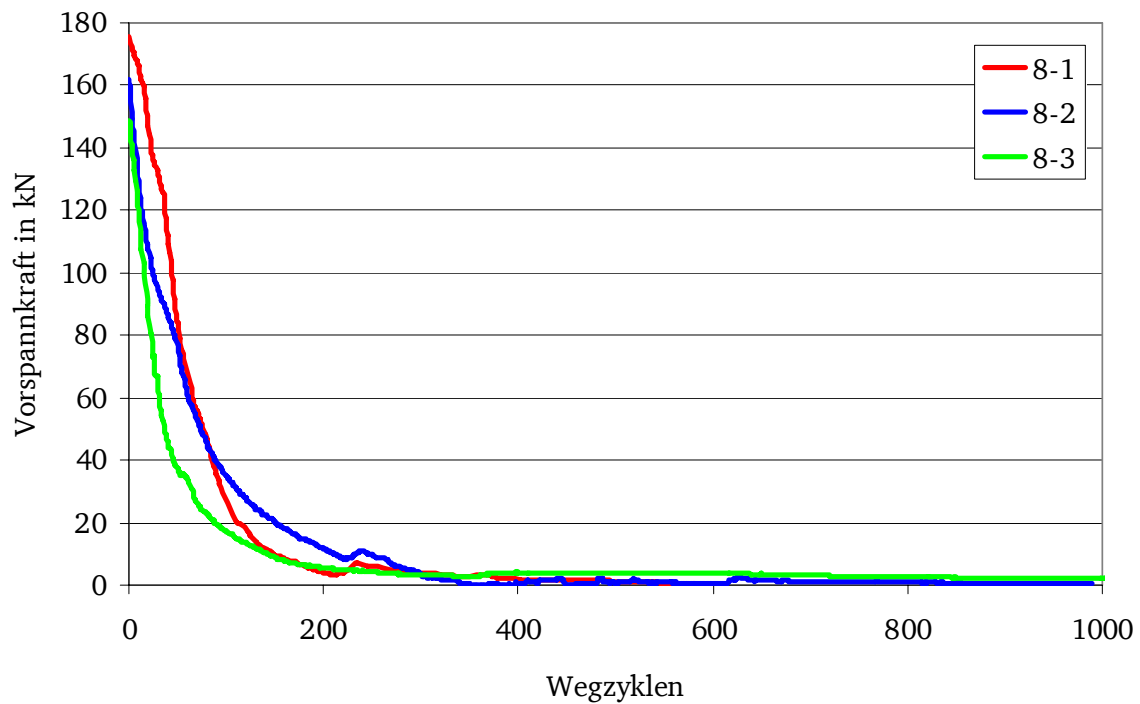


Bild 16: Versuchsergebnisse Reihe 8

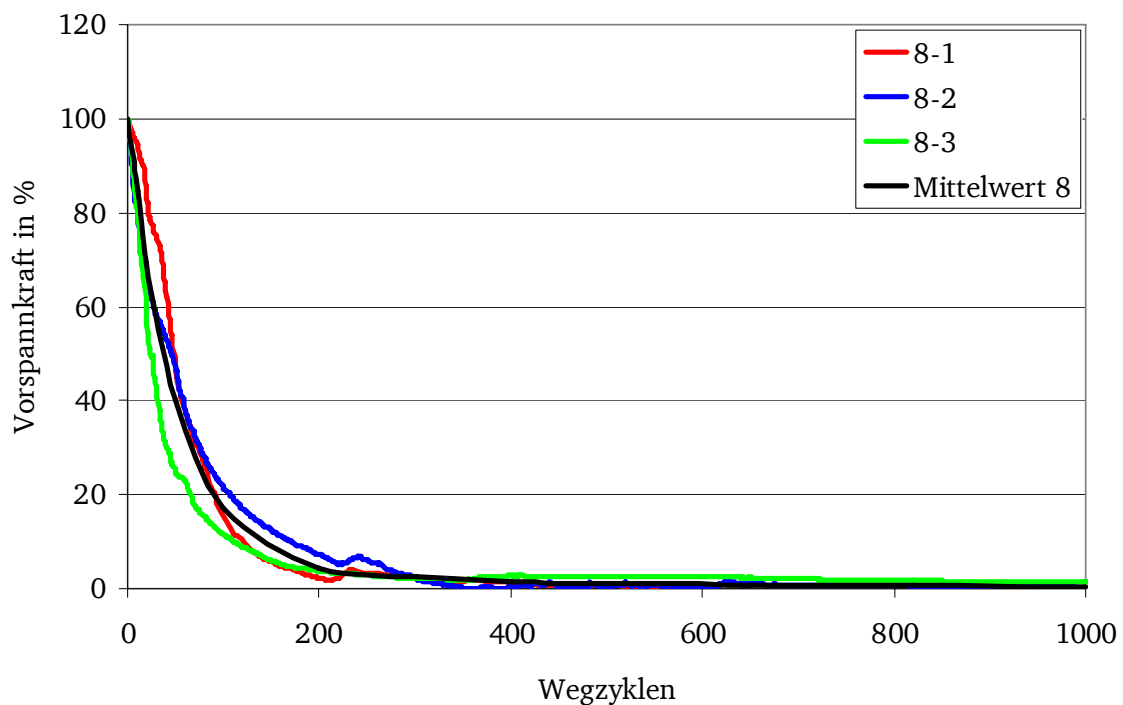


Bild 17: Versuchsergebnisse Reihe 8 in % der Anfangsvorspannkraft

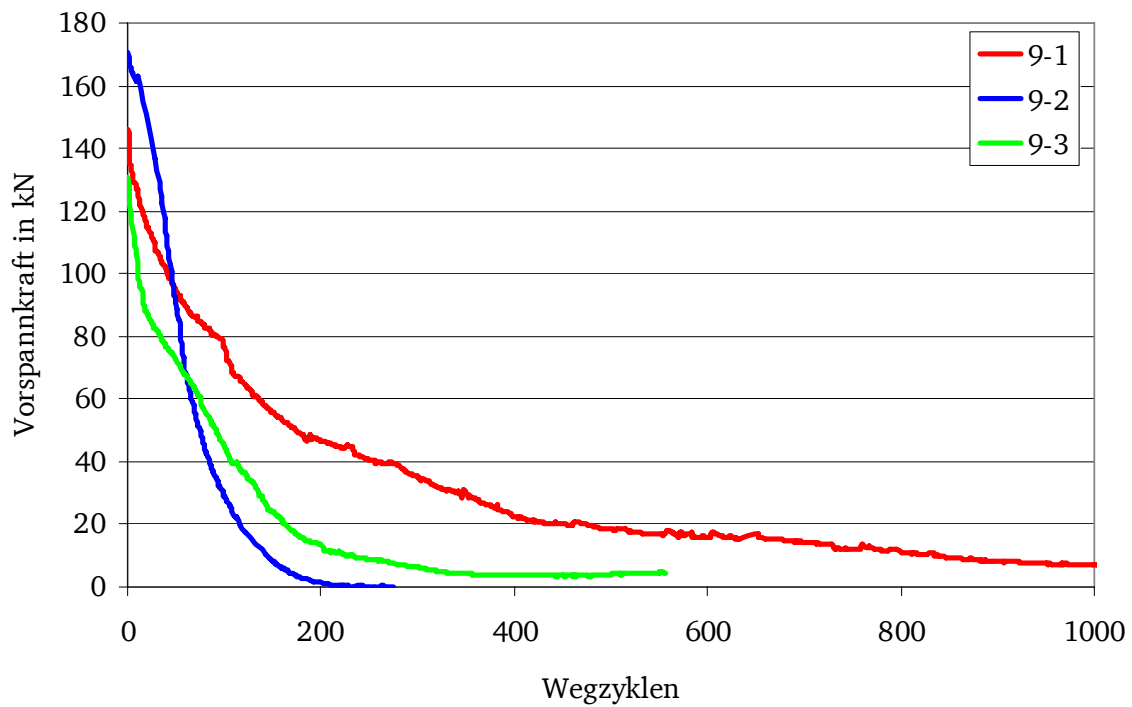


Bild 18: Versuchsergebnisse Reihe 9

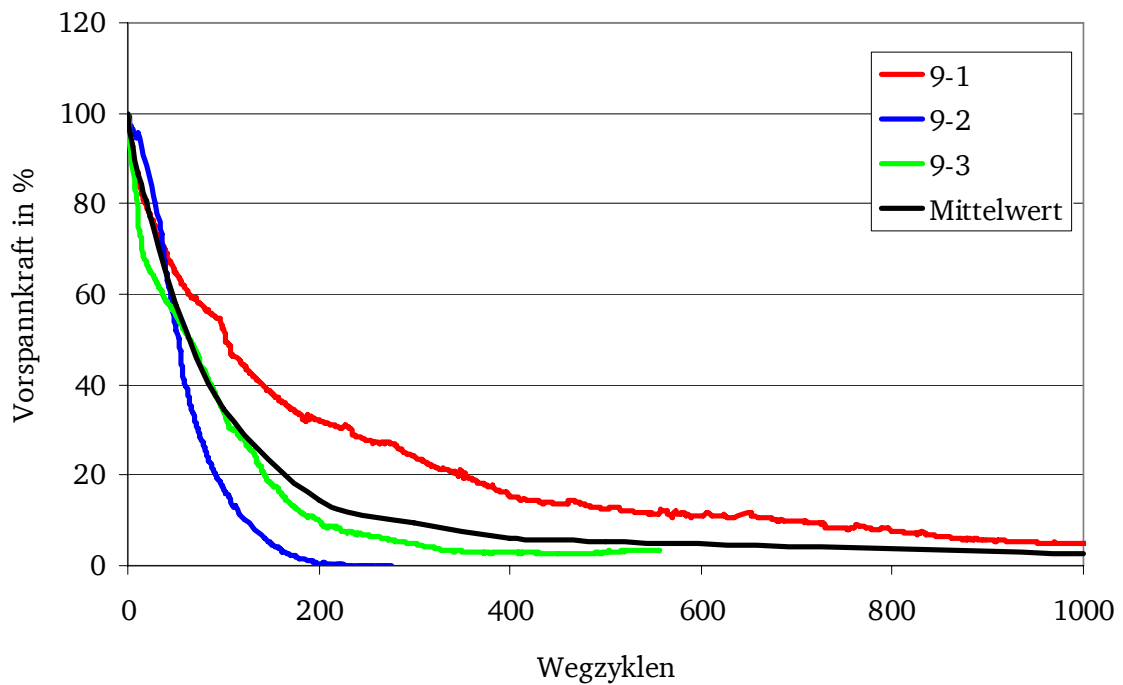


Bild 19: Versuchsergebnisse Reihe 9 in % der Anfangsvorspannkraft

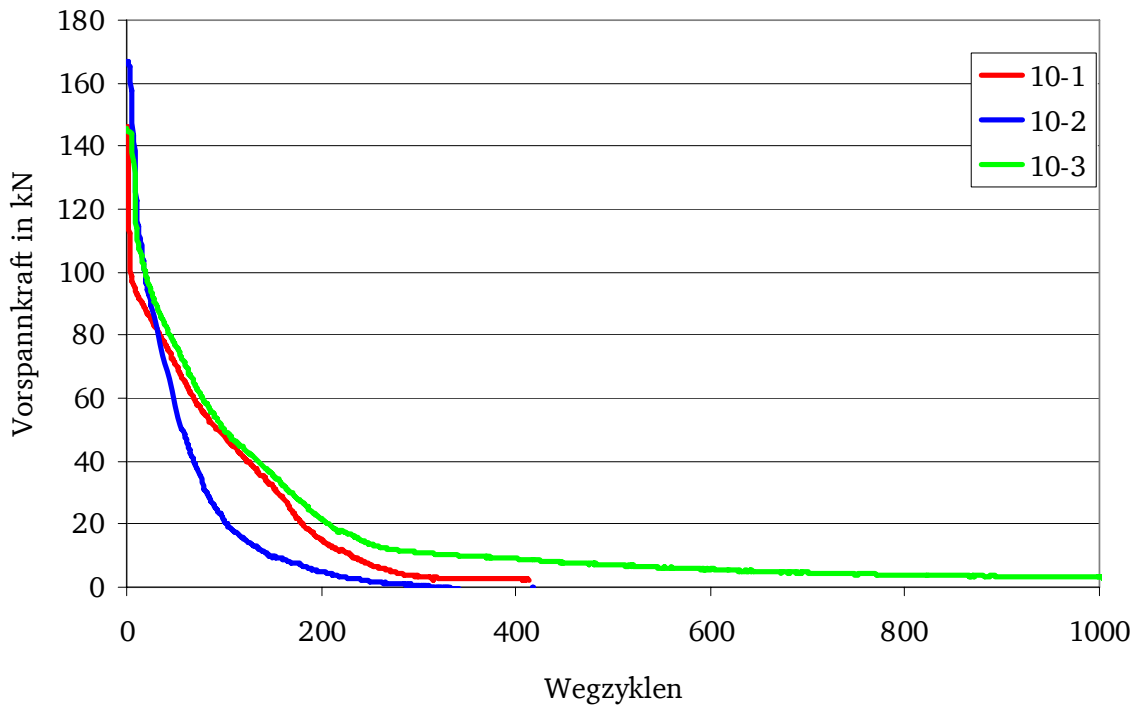


Bild 20: Versuchsergebnisse Reihe 10

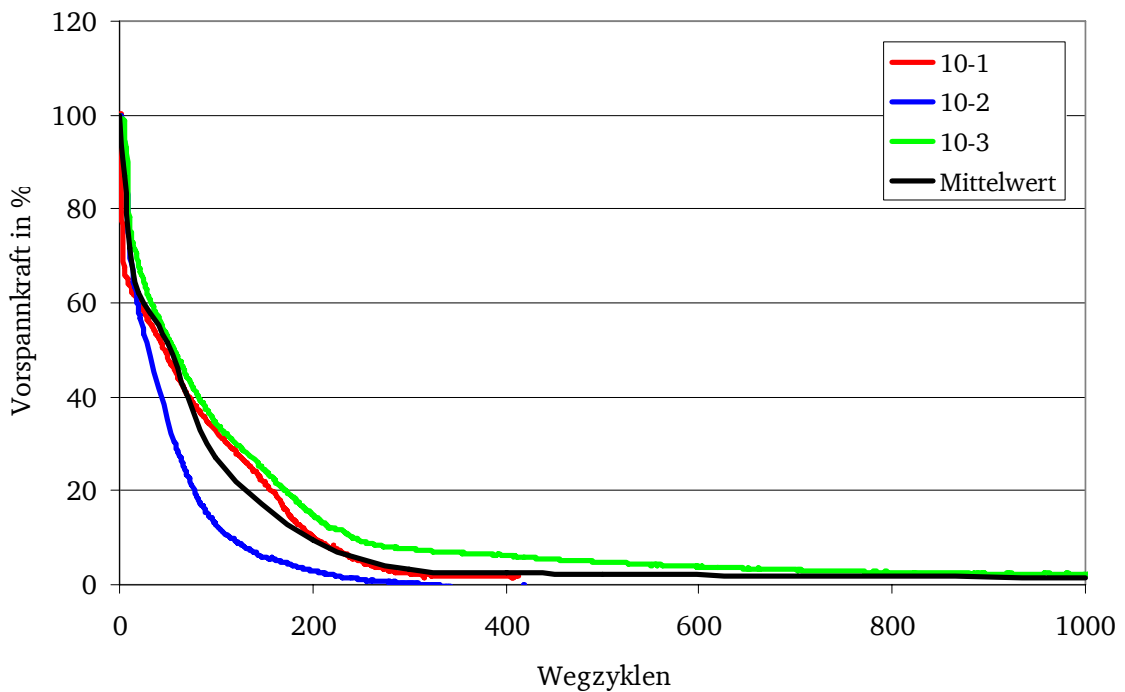


Bild 21: Versuchsergebnisse Reihe 10 in % der Anfangsvorspannkraft

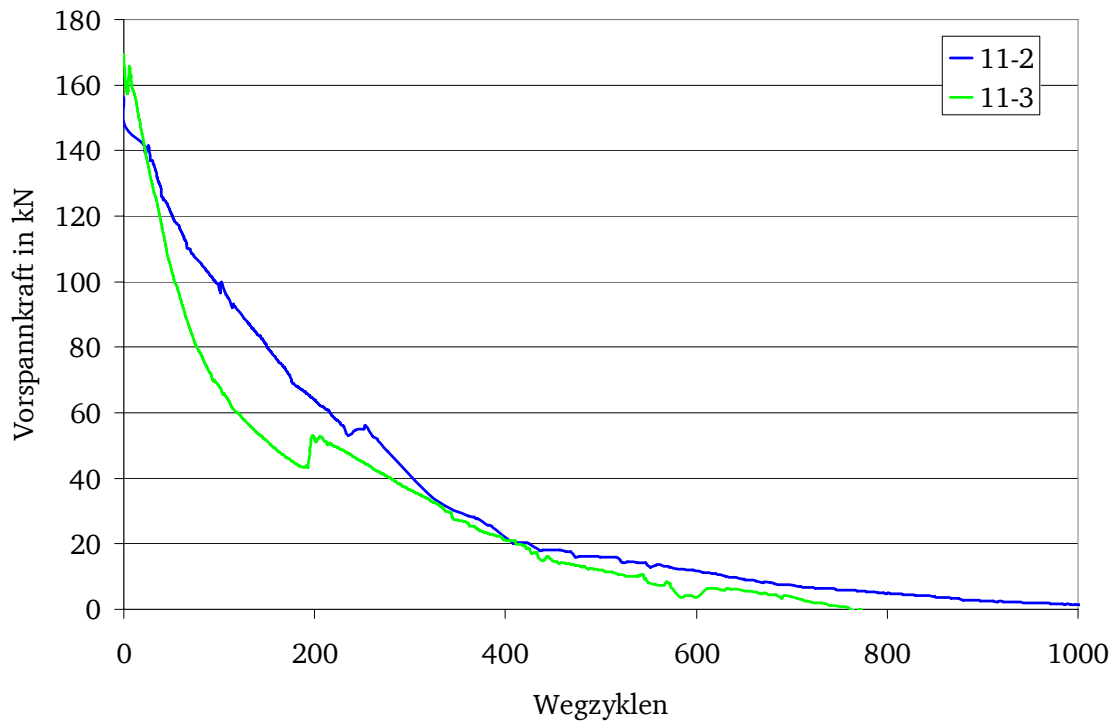


Bild 22: Versuchsergebnisse Reihe 11

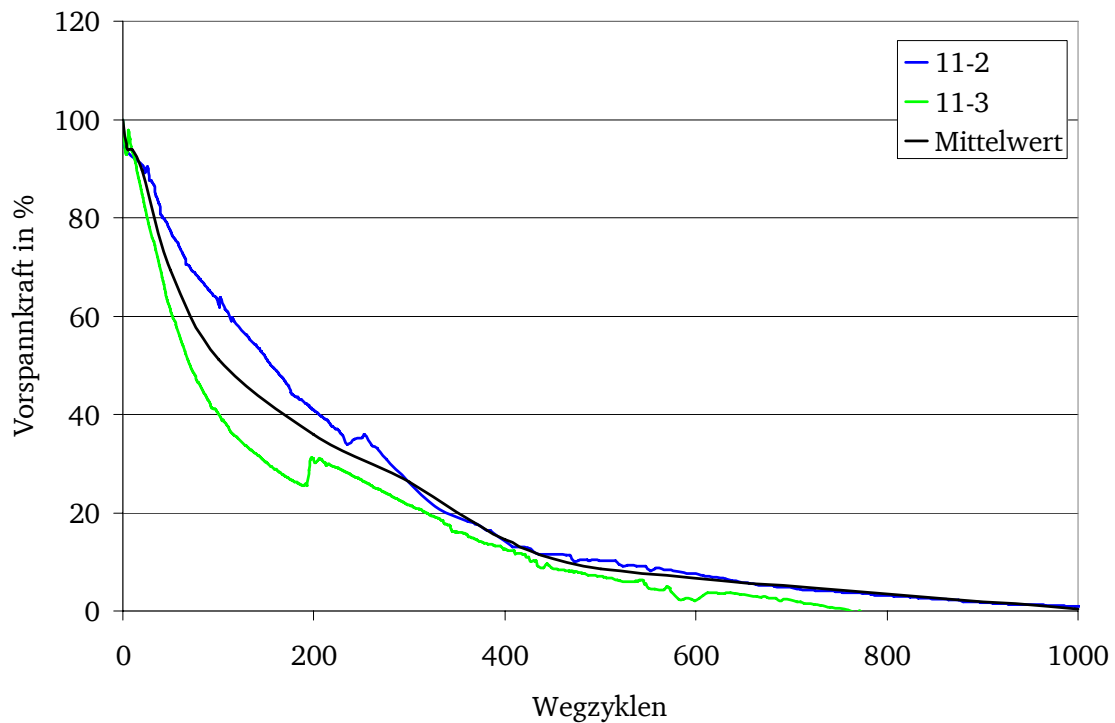


Bild 23: Versuchsergebnisse Reihe 11 in % der Anfangsvorspannkraft

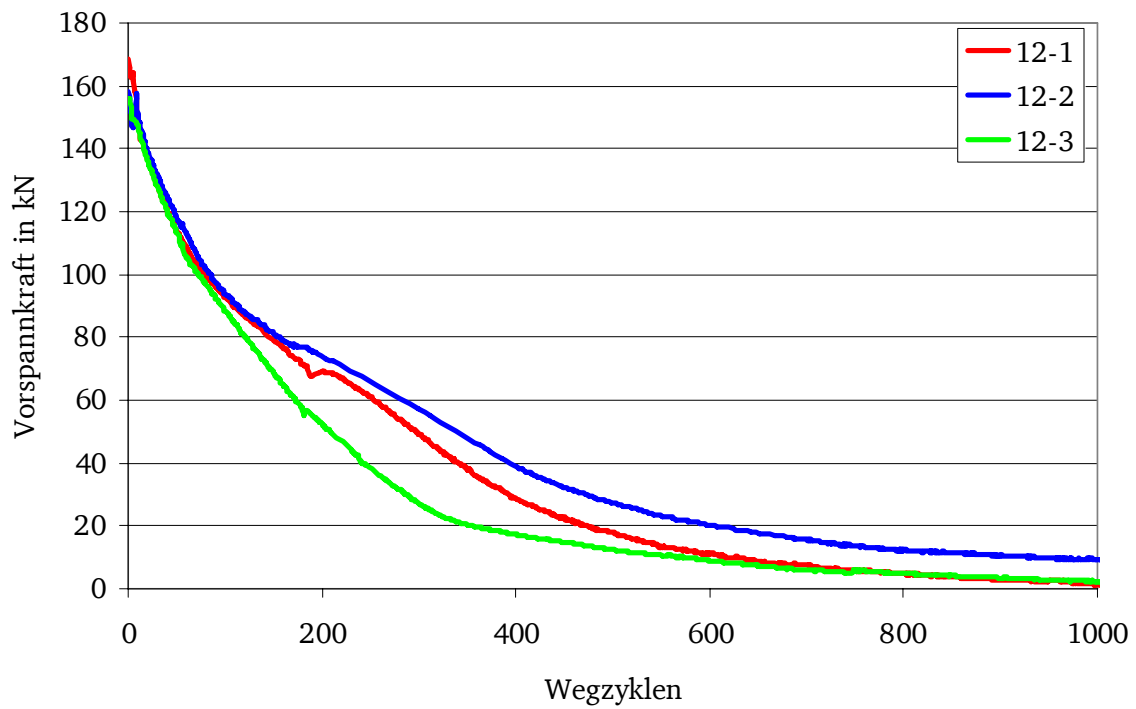


Bild 24: Versuchsergebnisse Reihe 12

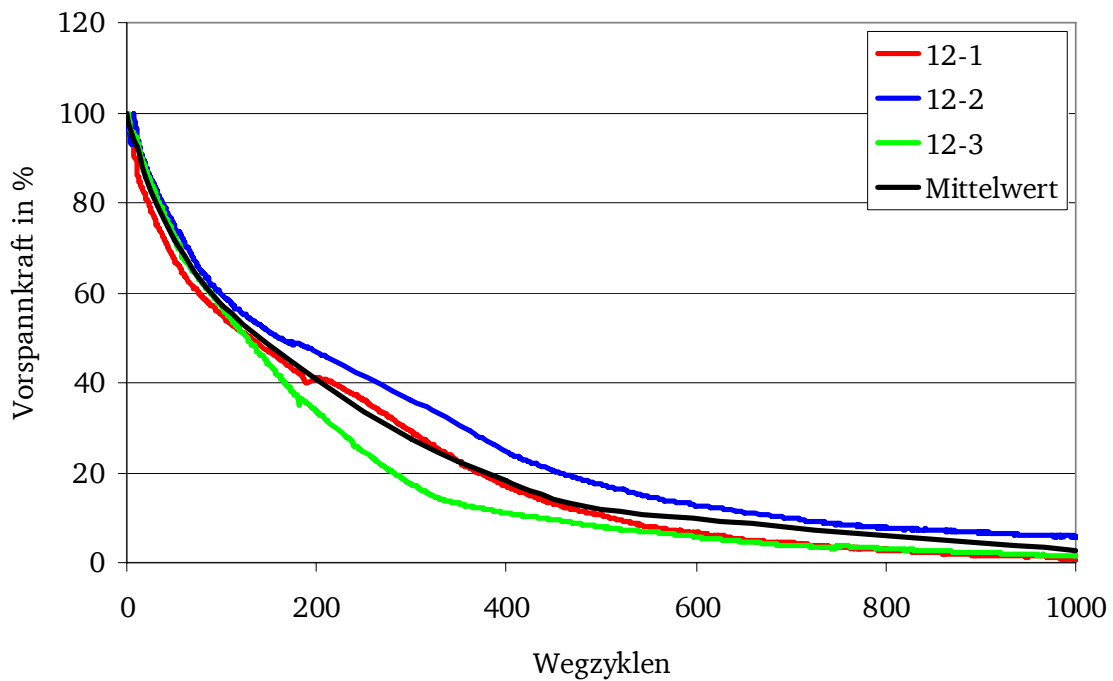


Bild 25: Versuchsergebnisse Reihe 12 in % der Anfangsvorspannkraft

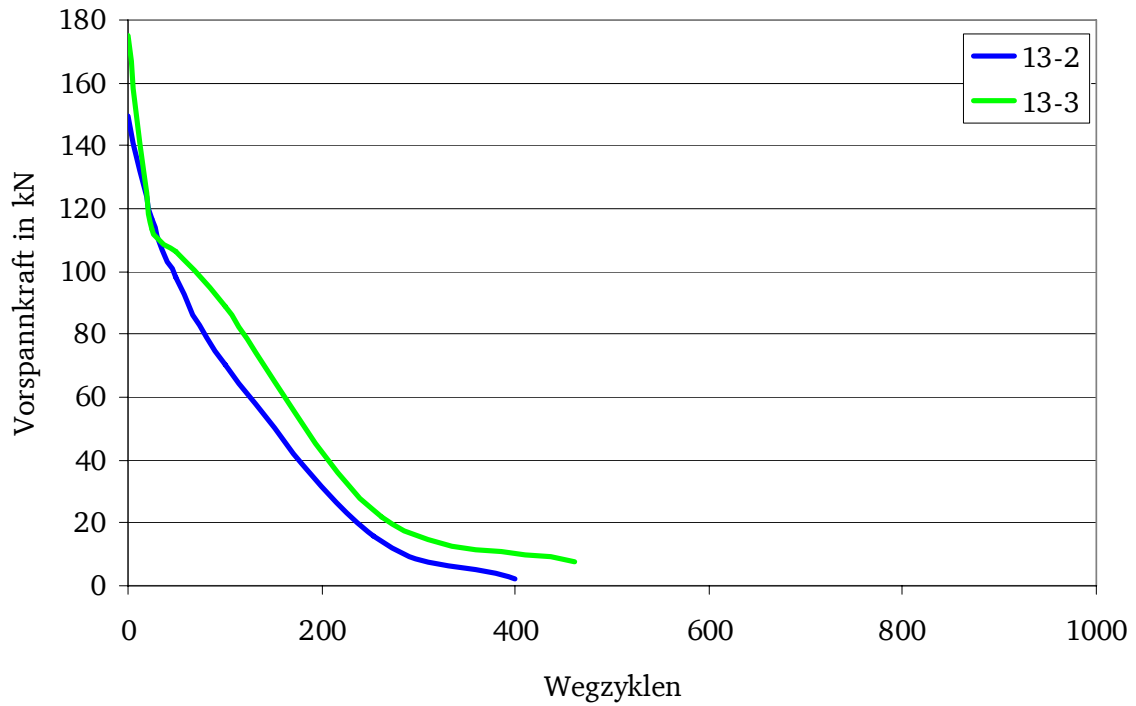


Bild 26: Versuchsergebnisse Reihe 13

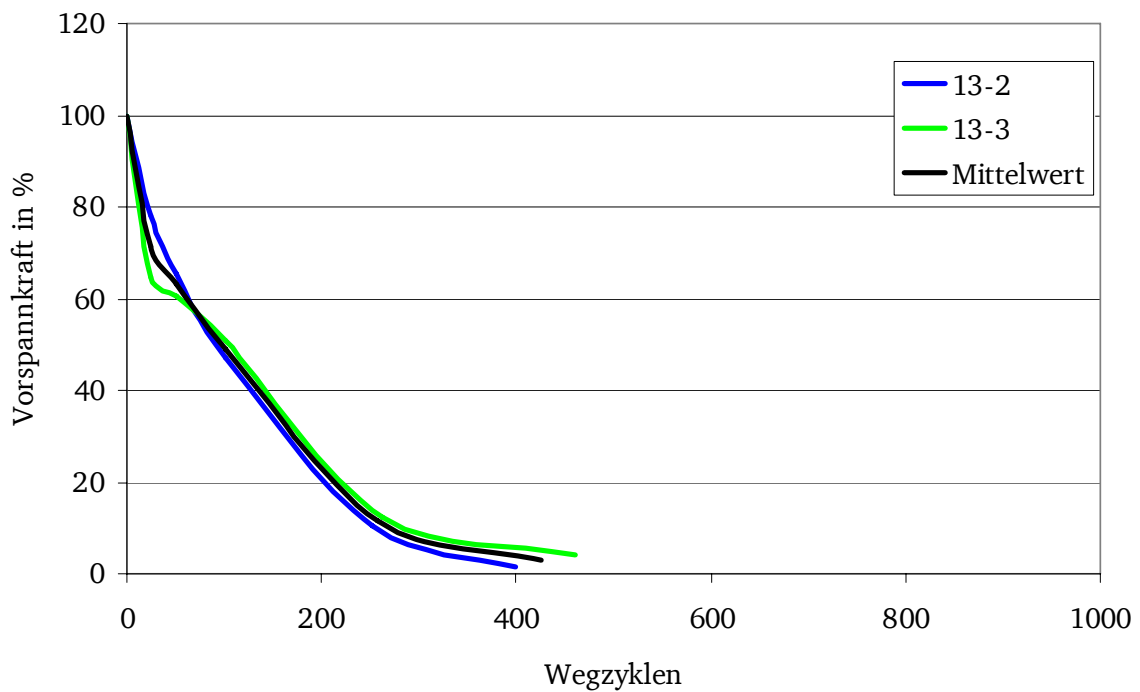


Bild 27: Versuchsergebnisse Reihe 13 in % der Anfangsvorspannkraft

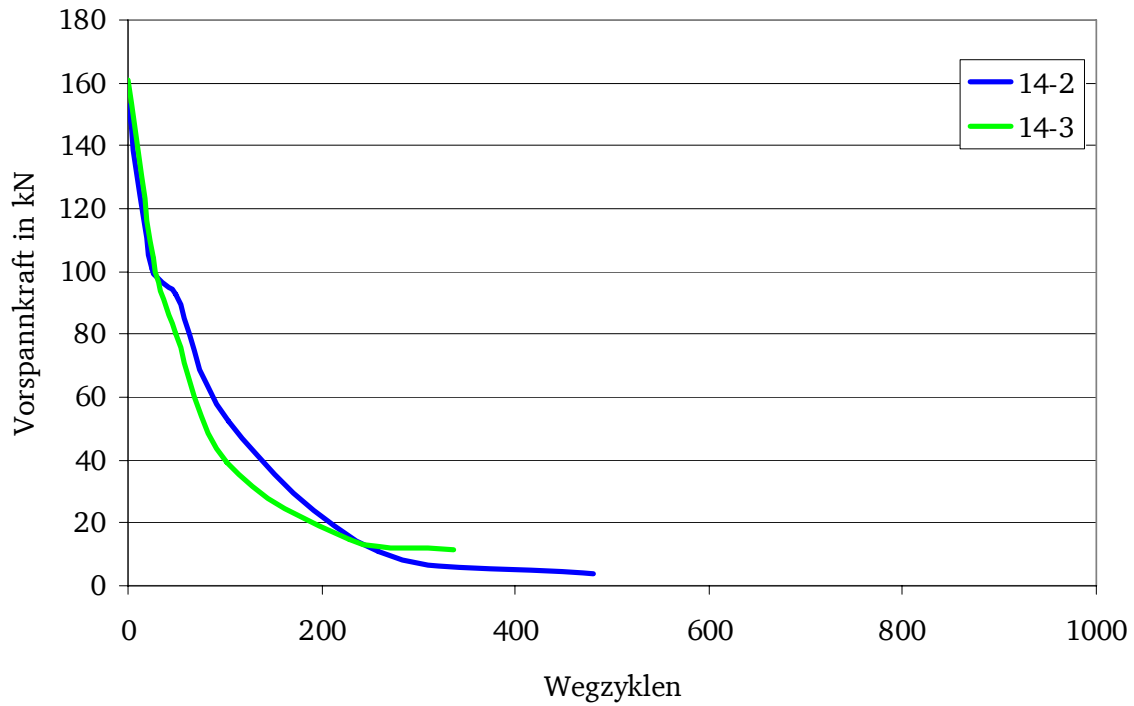


Bild 28: Versuchsergebnisse Reihe 14

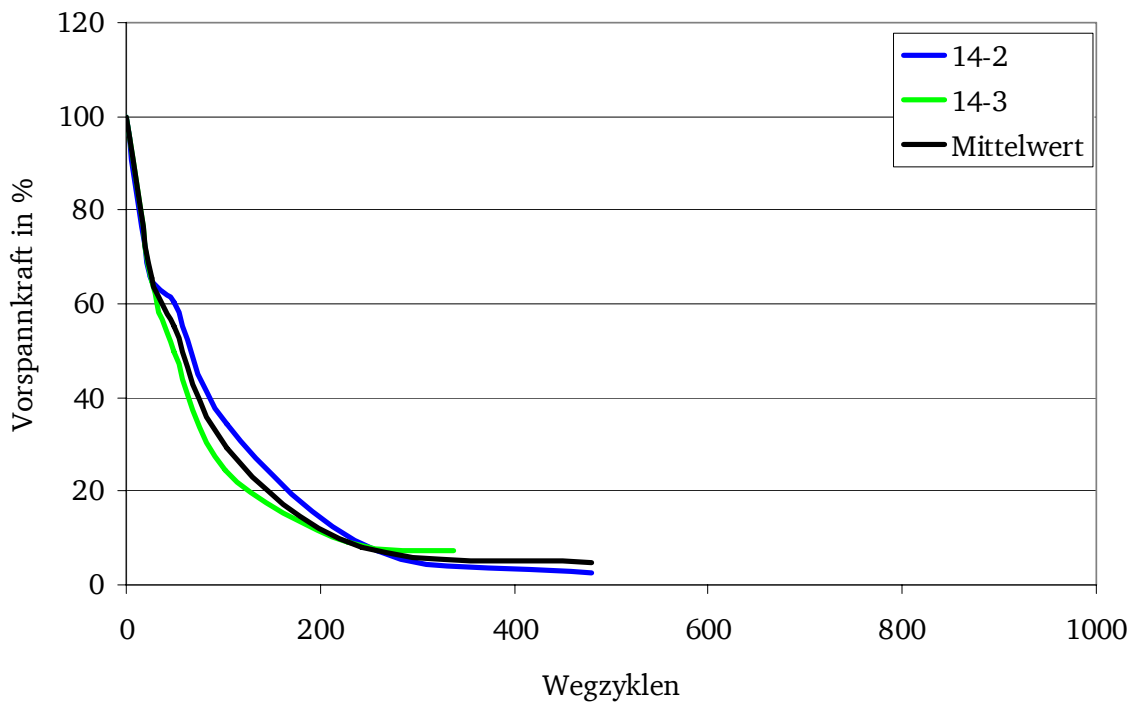


Bild 29: Versuchsergebnisse Reihe 14 in % der Anfangsvorspannkraft

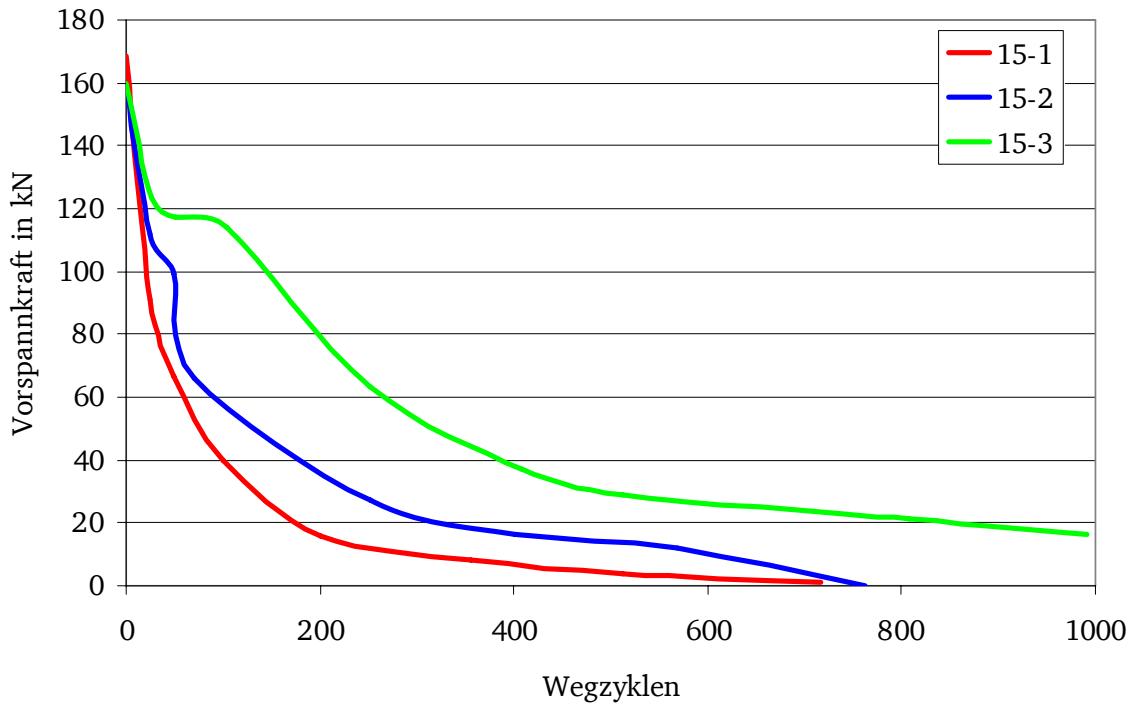


Bild 30: Versuchsergebnisse Reihe 15

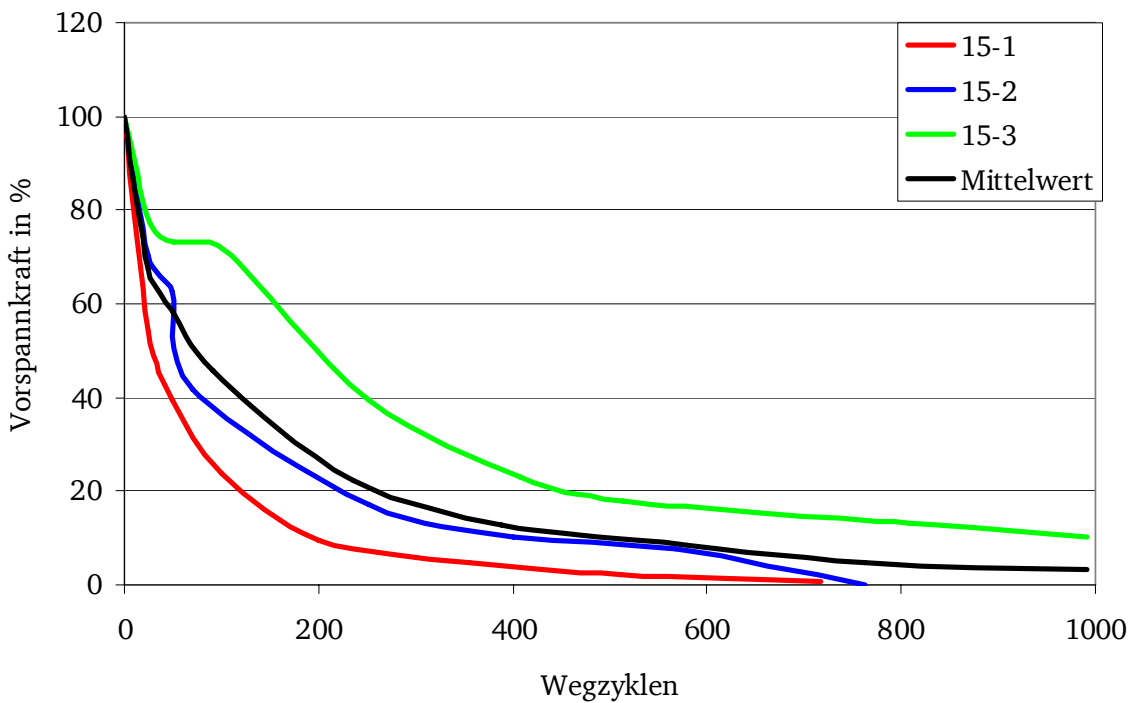


Bild 31: Versuchsergebnisse Reihe 15 in % der Anfangsvorspannkraft

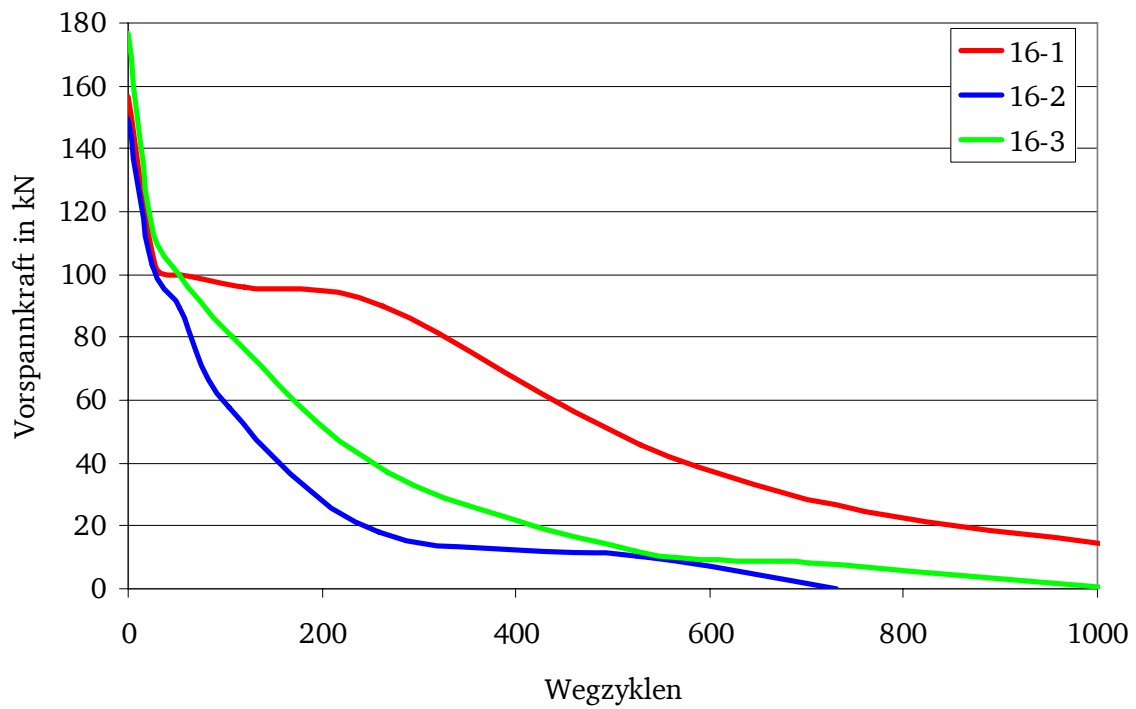


Bild 32: Versuchsergebnisse Reihe 16

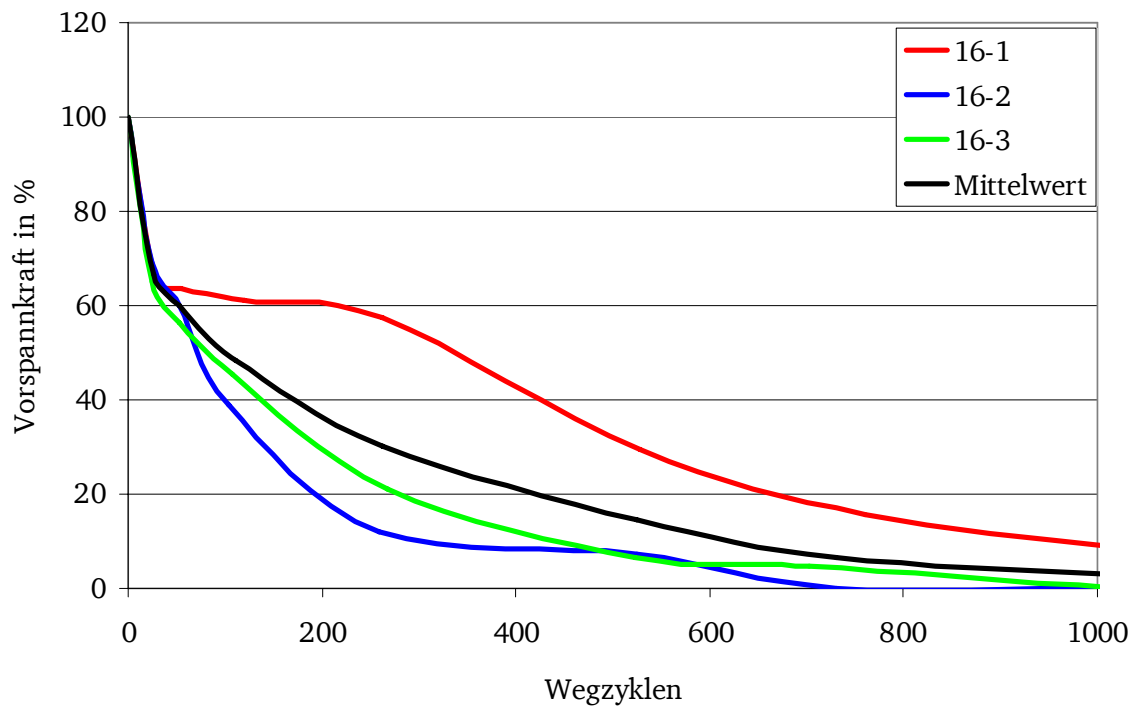


Bild 33: Versuchsergebnisse Reihe 16 in % der Anfangsvorspannkraft

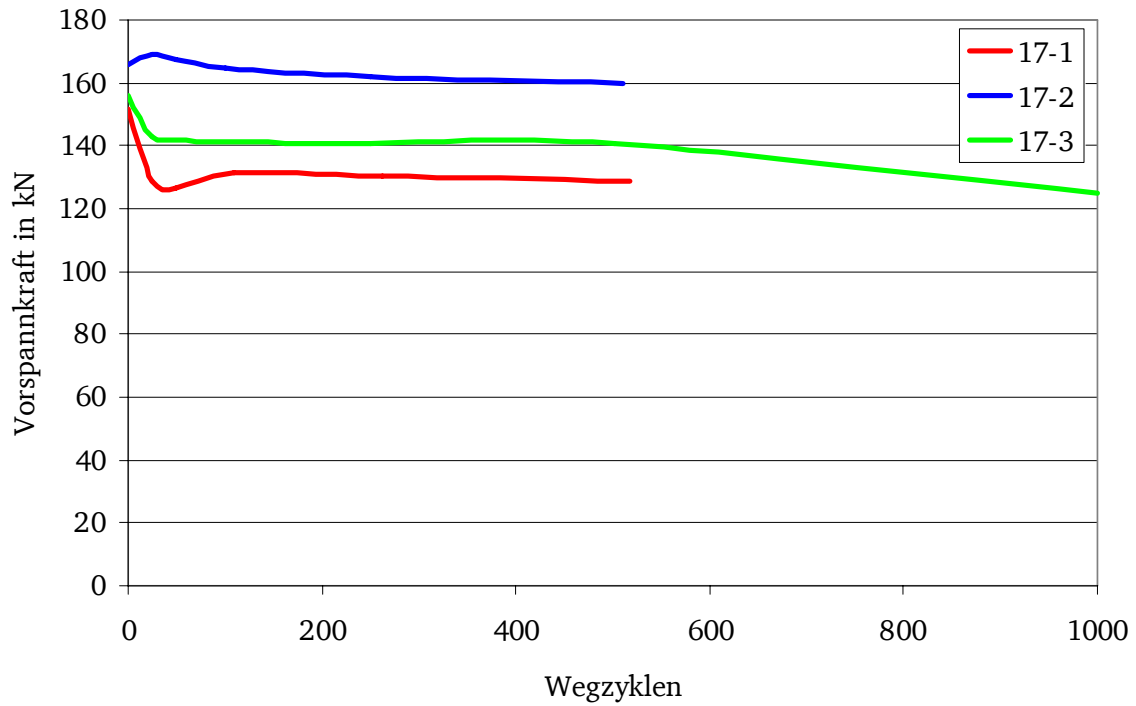


Bild 34: Versuchsergebnisse Reihe 17

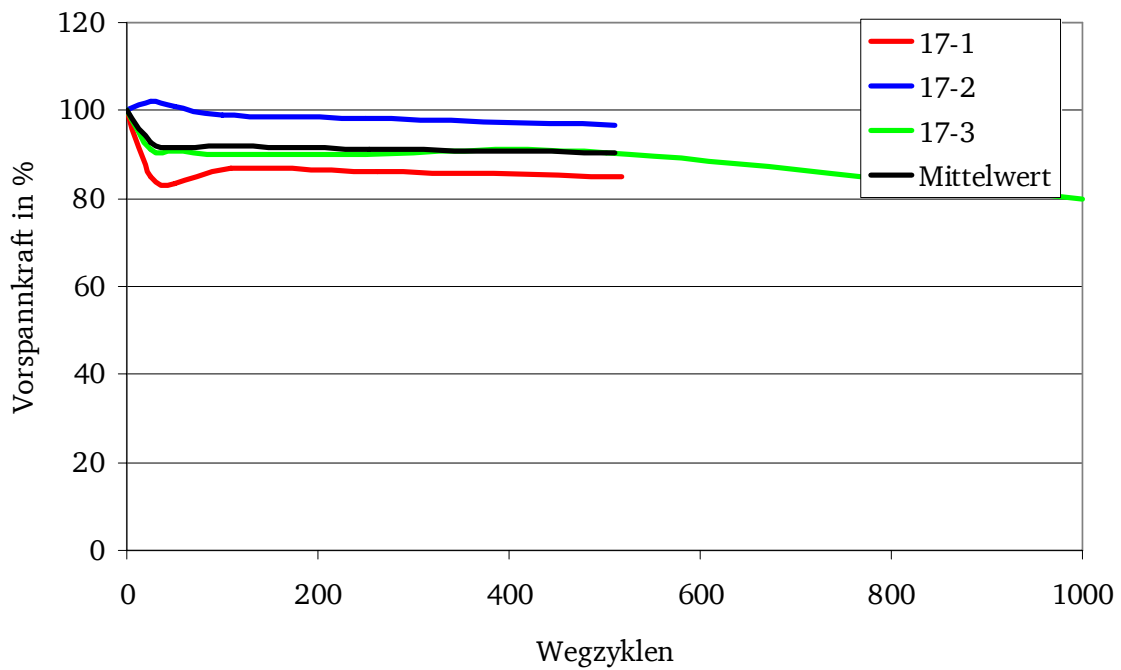


Bild 35: Versuchsergebnisse Reihe 17 in % der Anfangsvorspannkraft

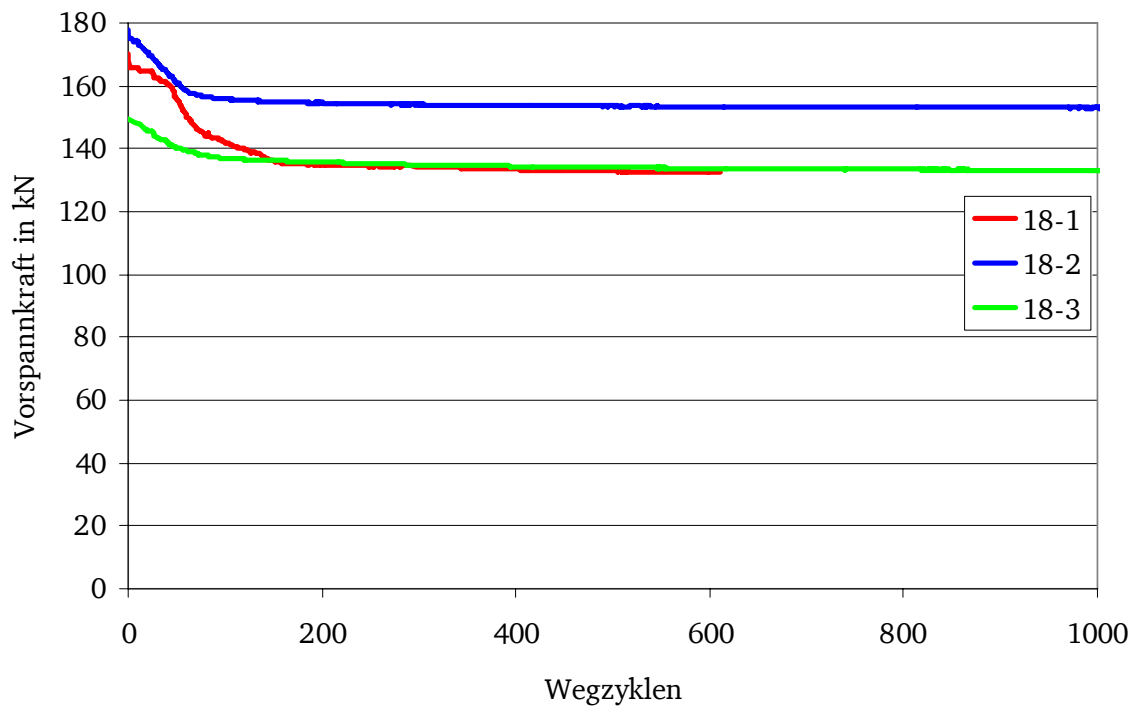


Bild 36: Versuchsergebnisse Reihe 18

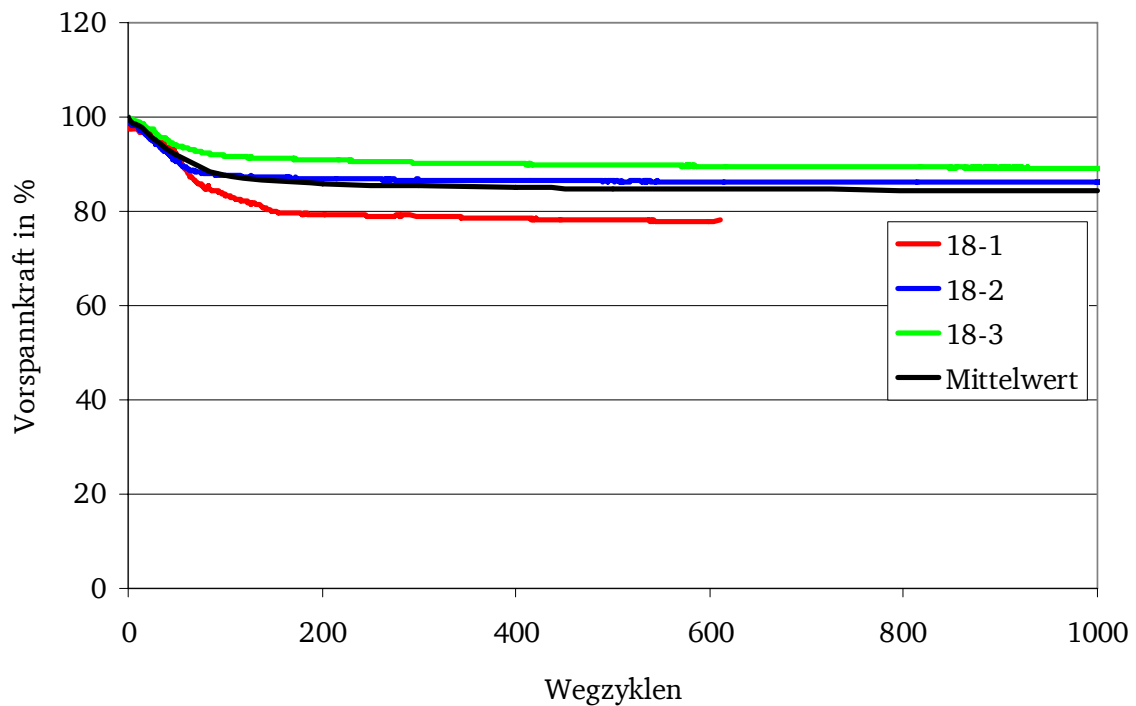
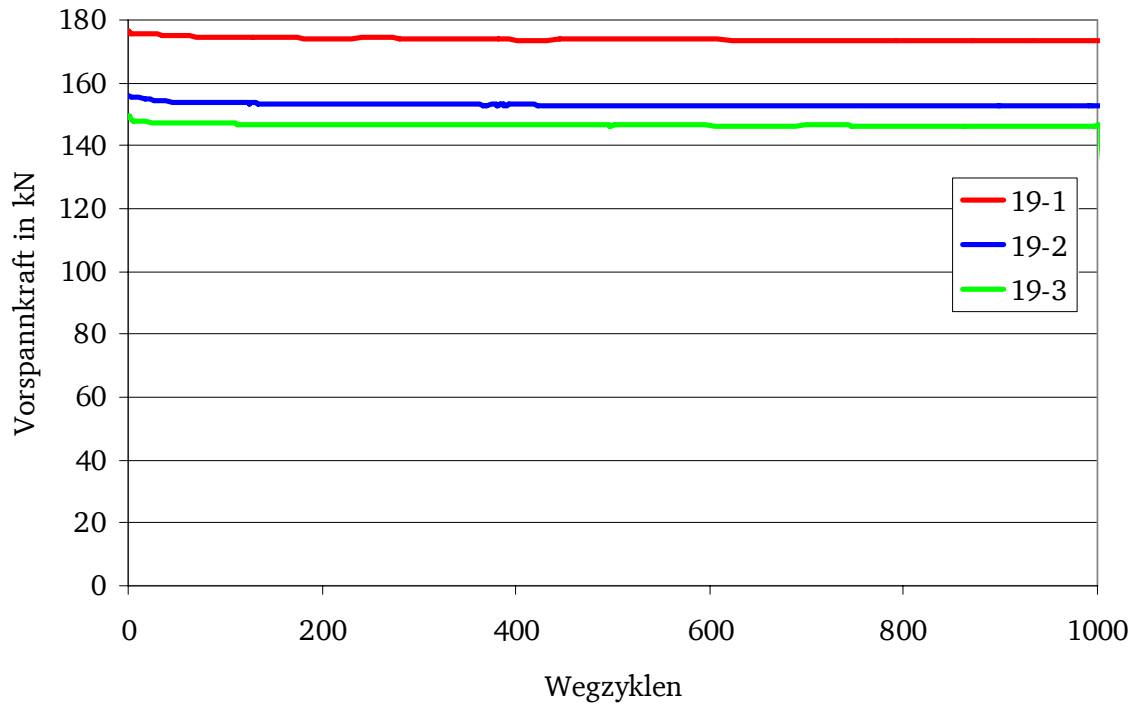
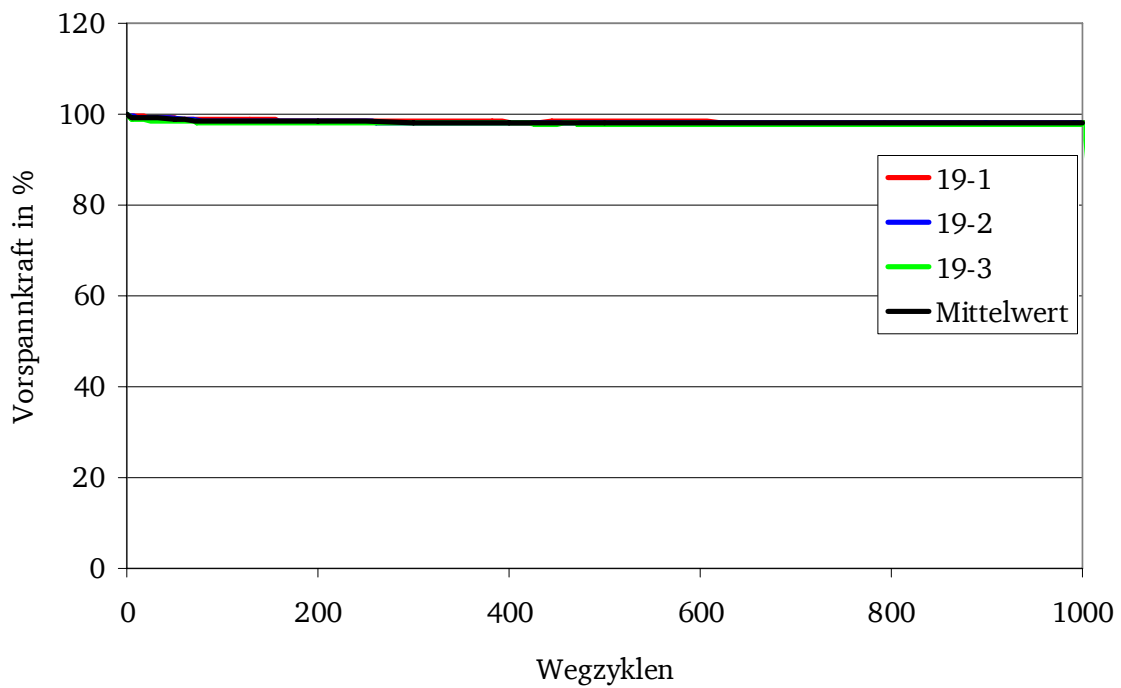


Bild 37: Versuchsergebnisse Reihe 18 in % der Anfangsvorspannkraft



**Bild 38: Versuchsergebnisse Reihe 19**



**Bild 39: Versuchsergebnisse Reihe 19 in % der Anfangsvorspannkraft**

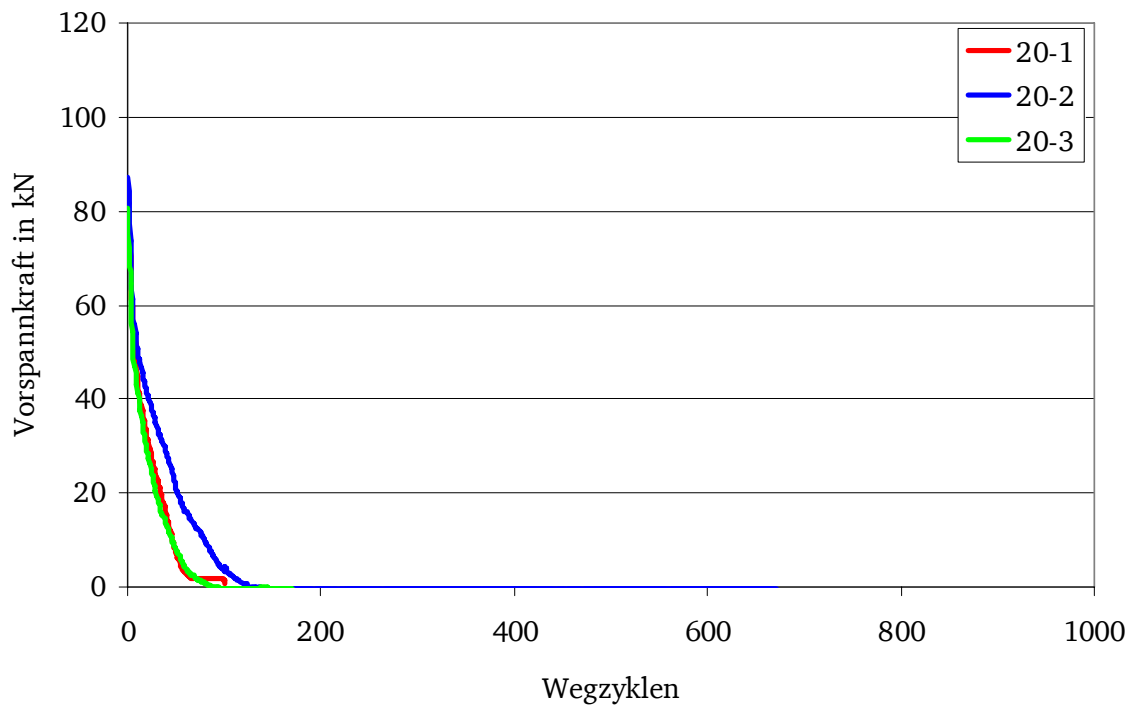


Bild 40: Versuchsergebnisse Reihe 20

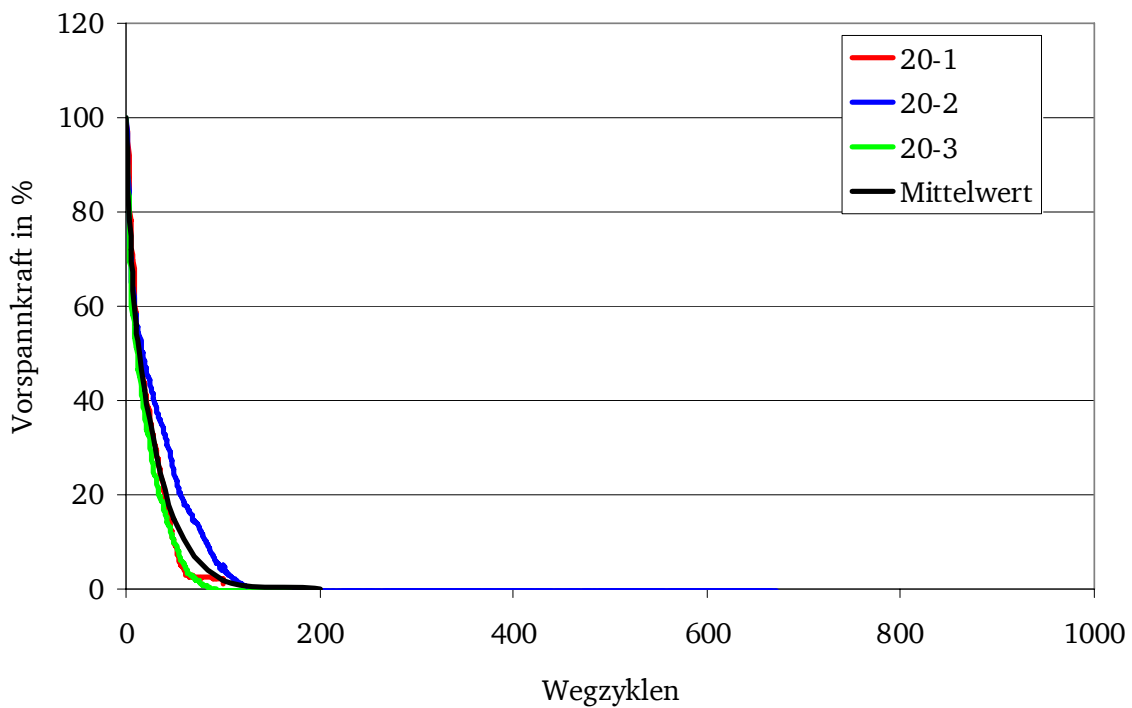


Bild 41: Versuchsergebnisse Reihe 20 in % der Anfangsvorspannkraft

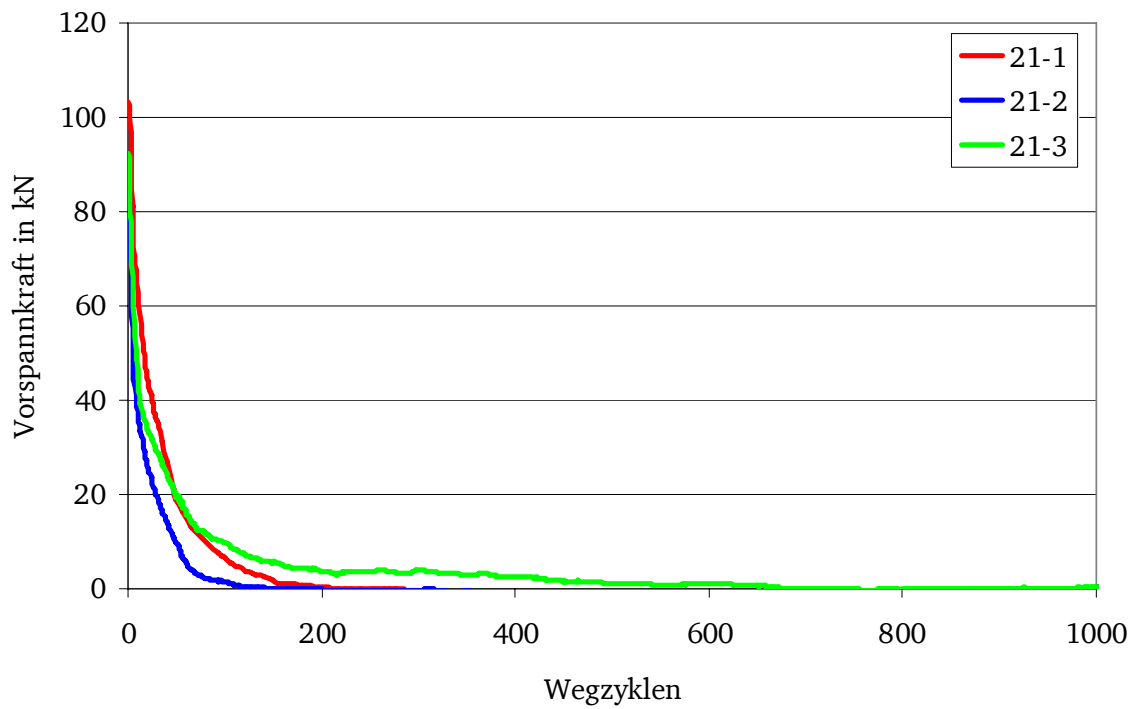


Bild 42: Versuchsergebnisse Reihe 21

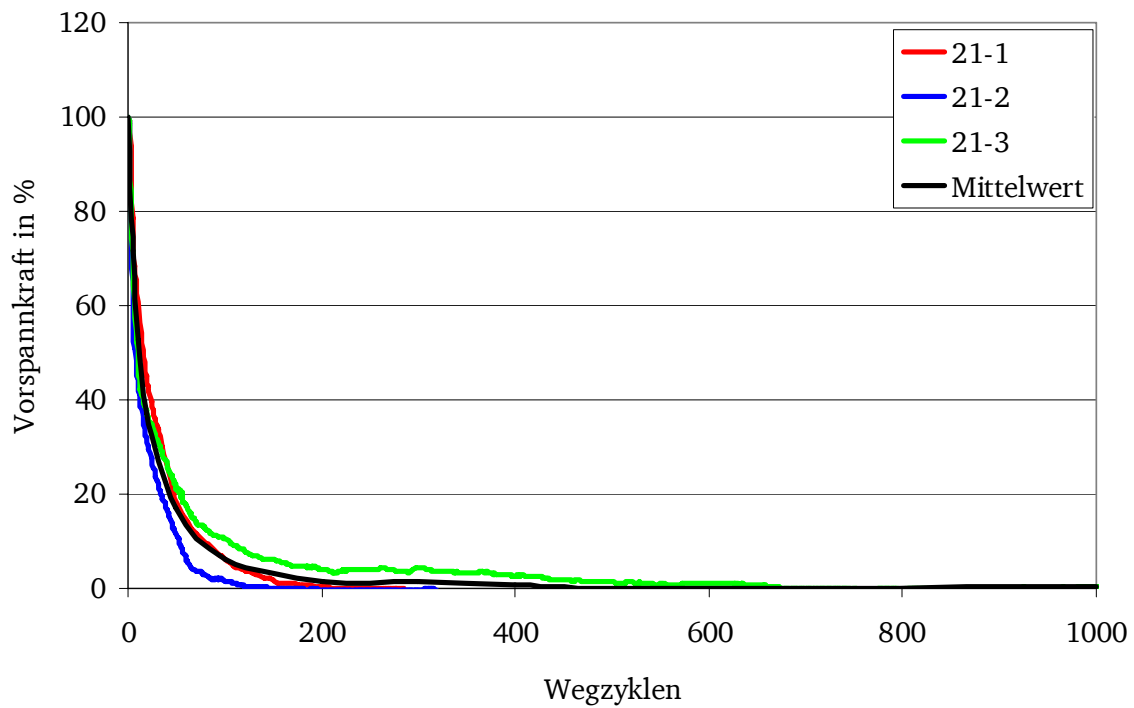


Bild 43: Versuchsergebnisse Reihe 21 in % der Anfangsvorspannkraft

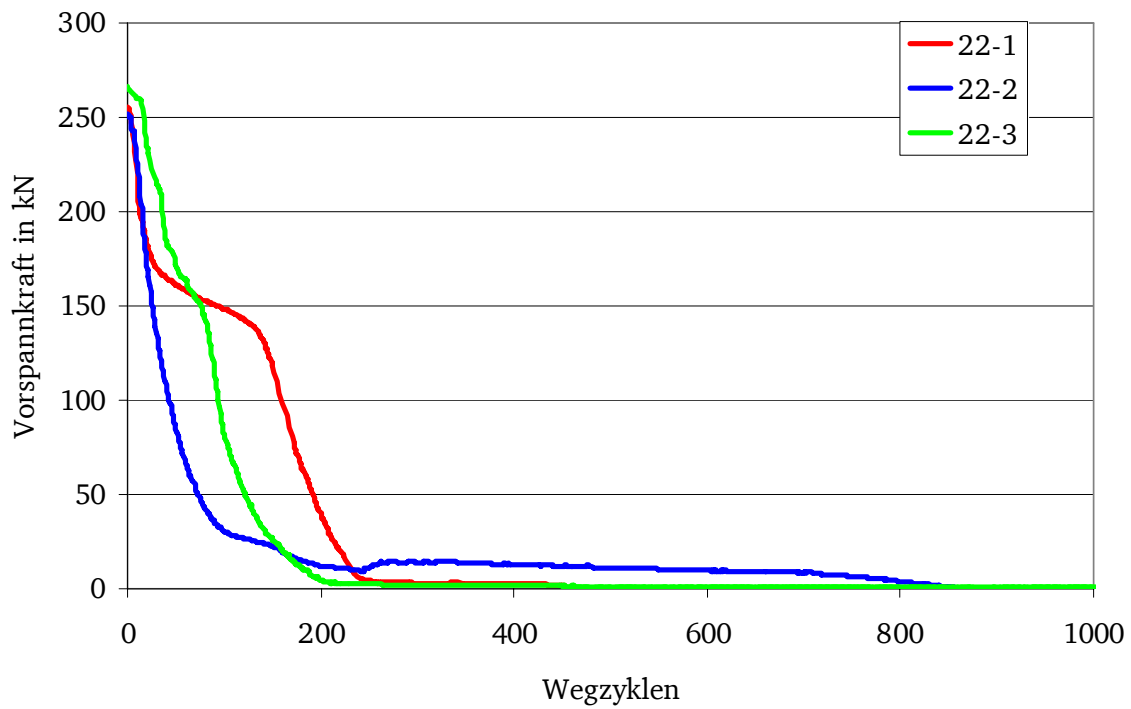


Bild 44: Versuchsergebnisse Reihe 22

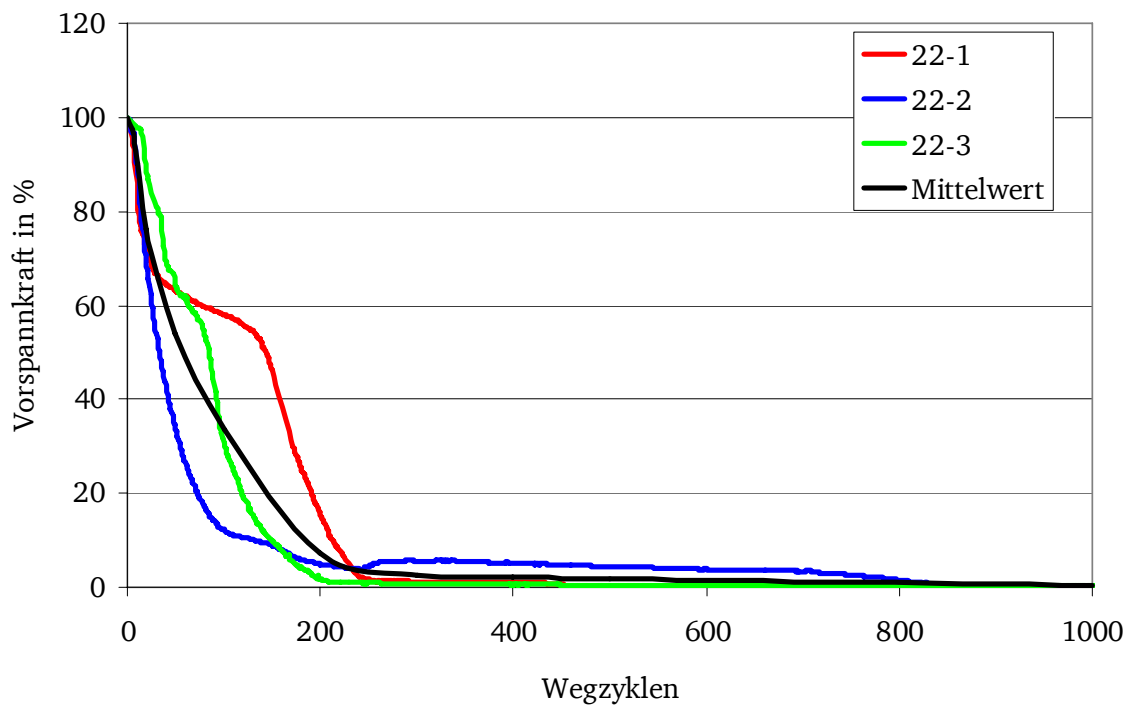


Bild 45: Versuchsergebnisse Reihe 22 in % der Anfangsvorspannkraft

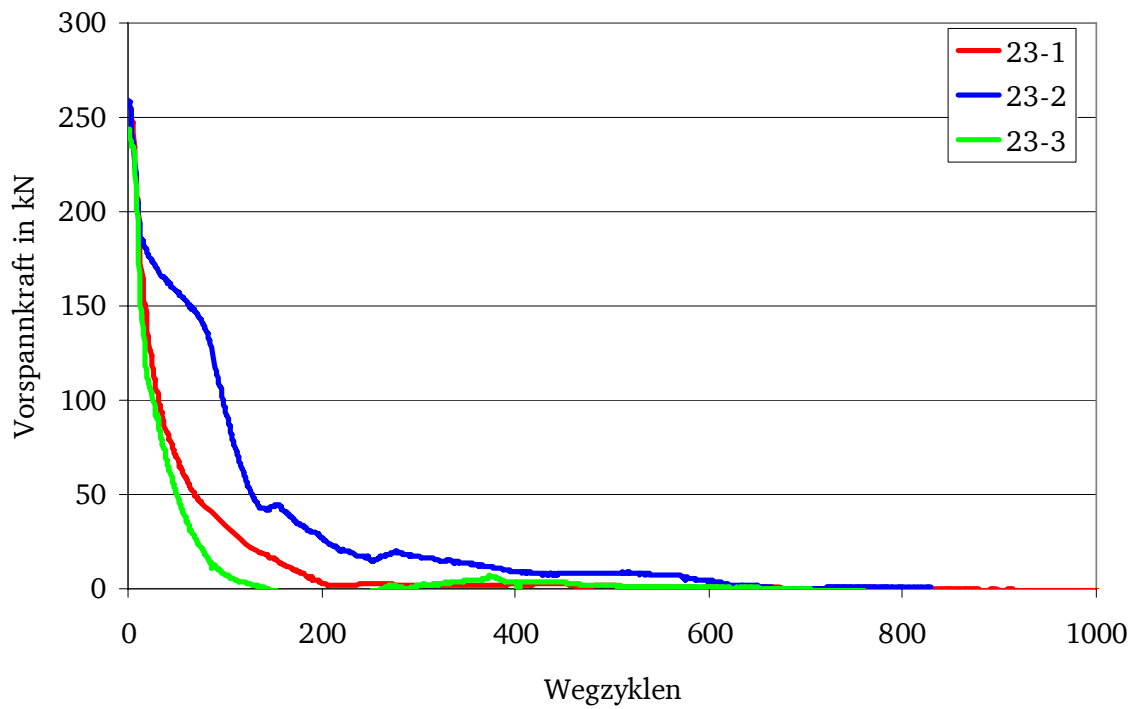


Bild 46: Versuchsergebnisse Reihe 23

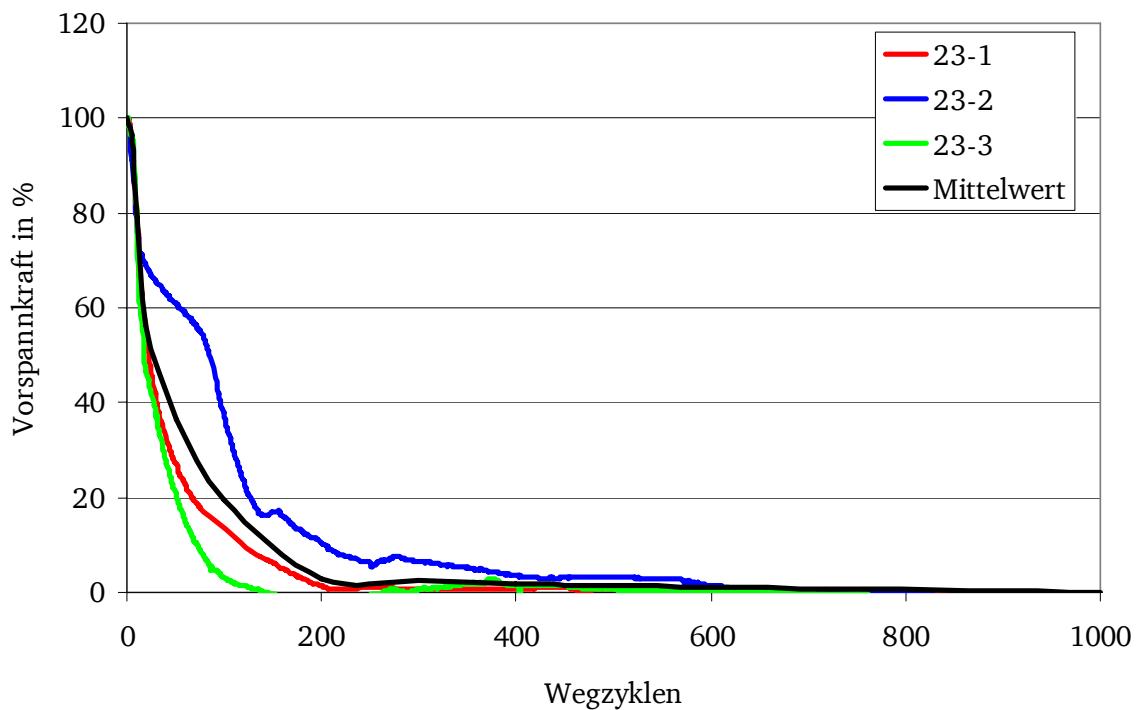


Bild 47: Versuchsergebnisse Reihe 23 in % der Anfangsvorspannkraft

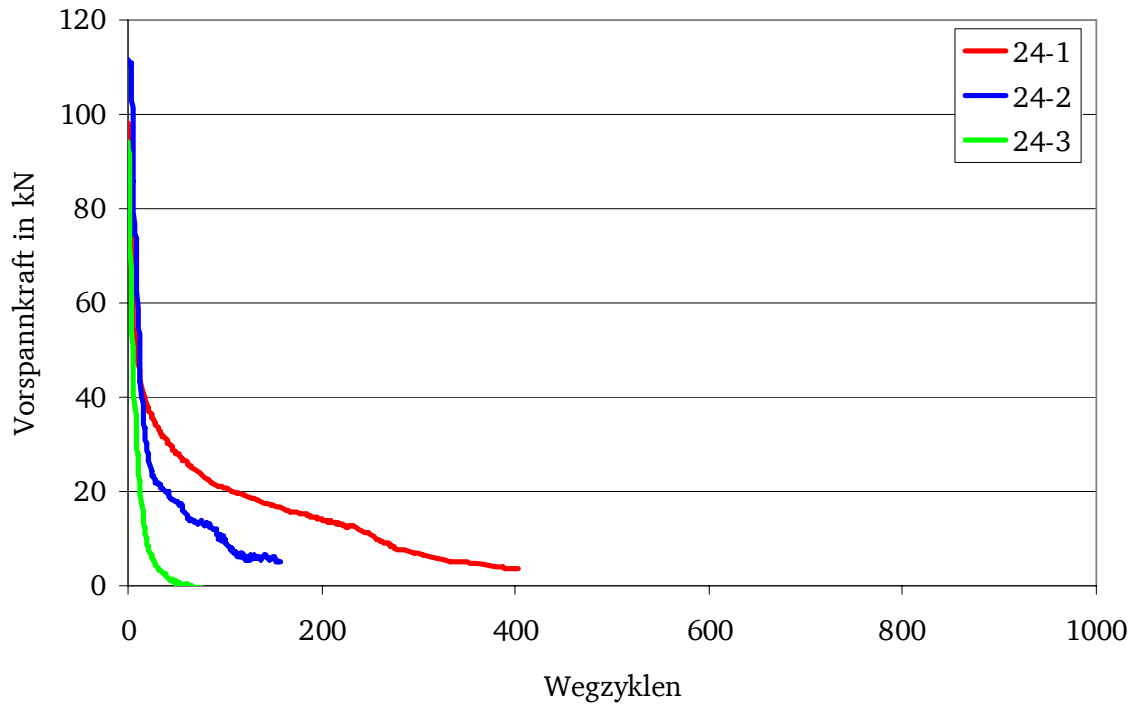


Bild 48: Versuchsergebnisse Reihe 24

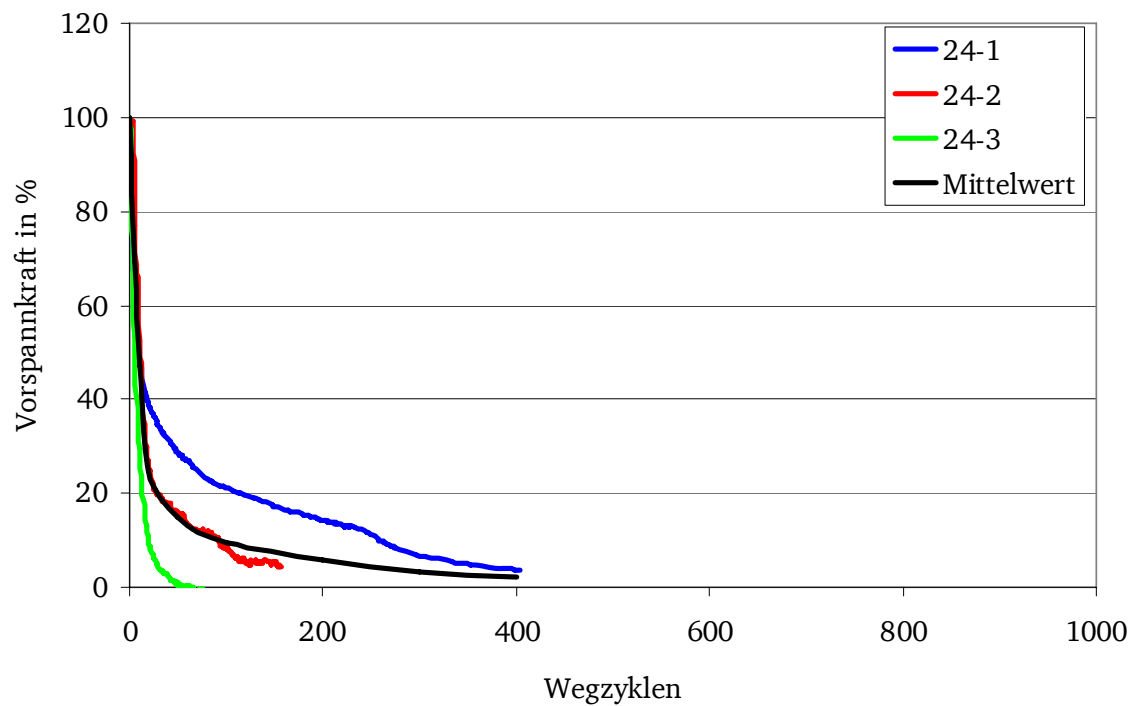


Bild 49: Versuchsergebnisse Reihe 24 in % der Anfangsvorspannkraft

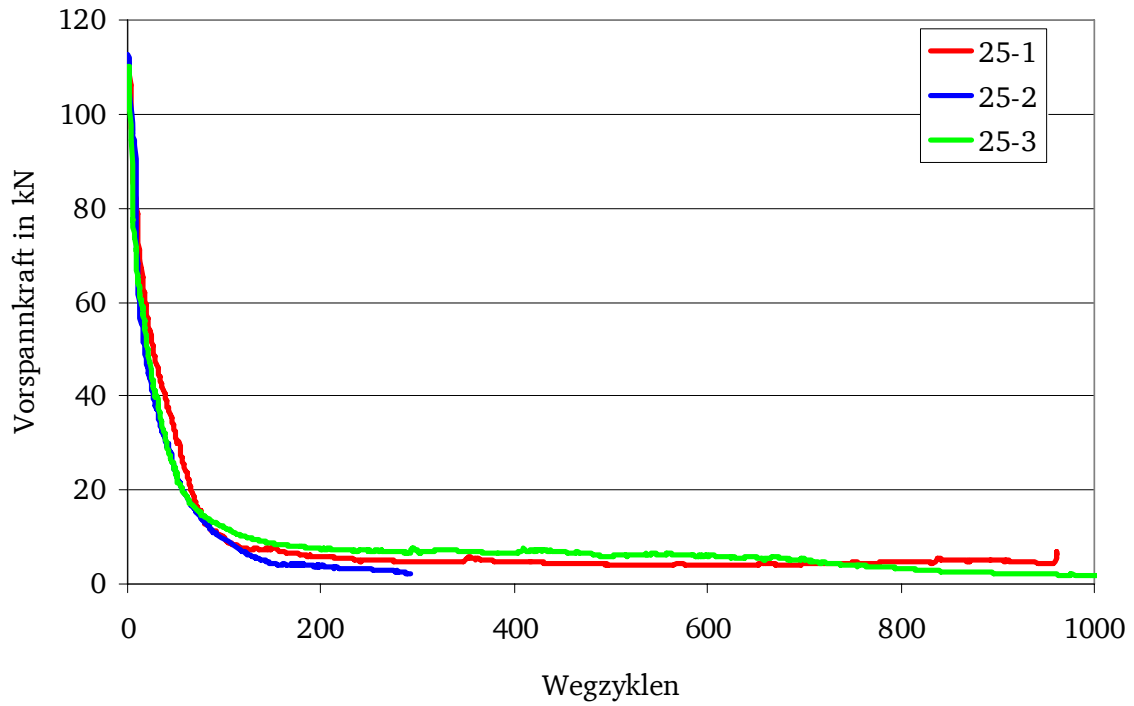


Bild 50: Versuchsergebnisse Reihe 25

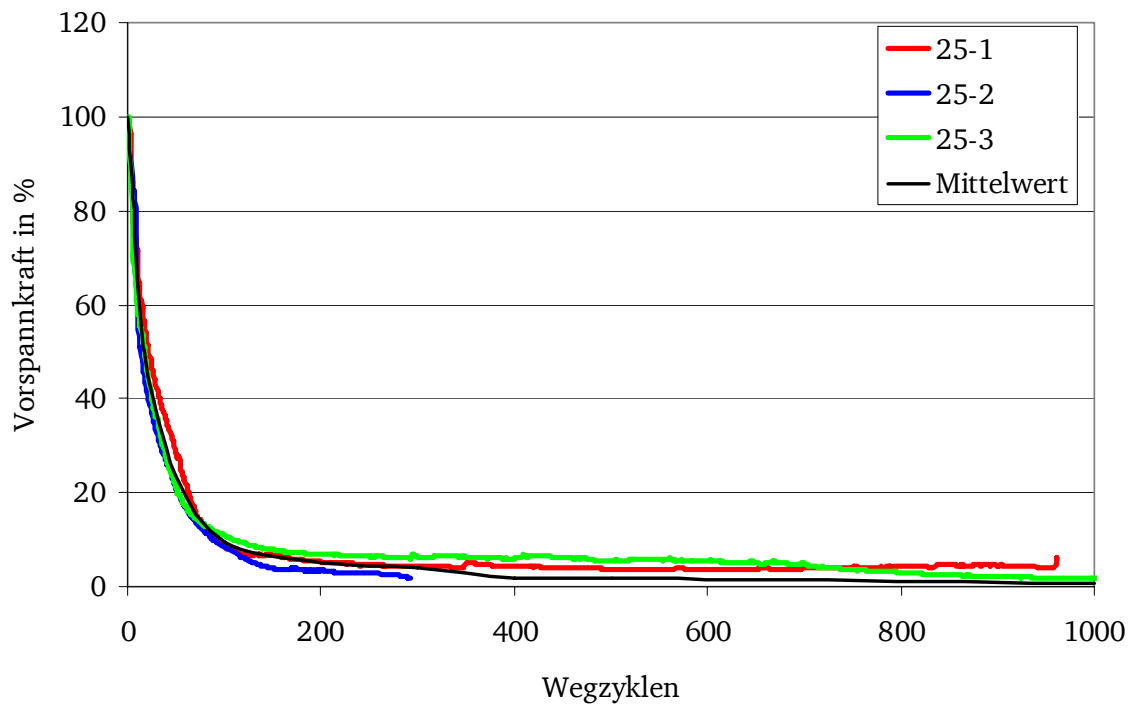


Bild 51: Versuchsergebnisse Reihe 25 in % der Anfangsvorspannkraft

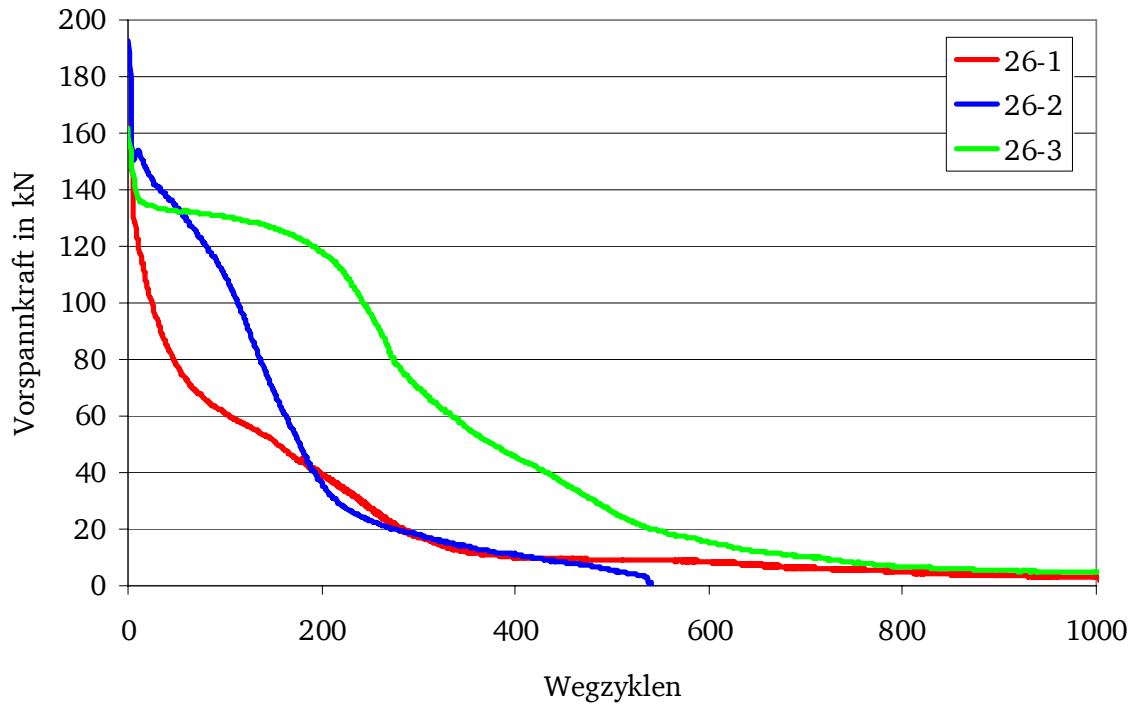


Bild 52: Versuchsergebnisse Reihe 26

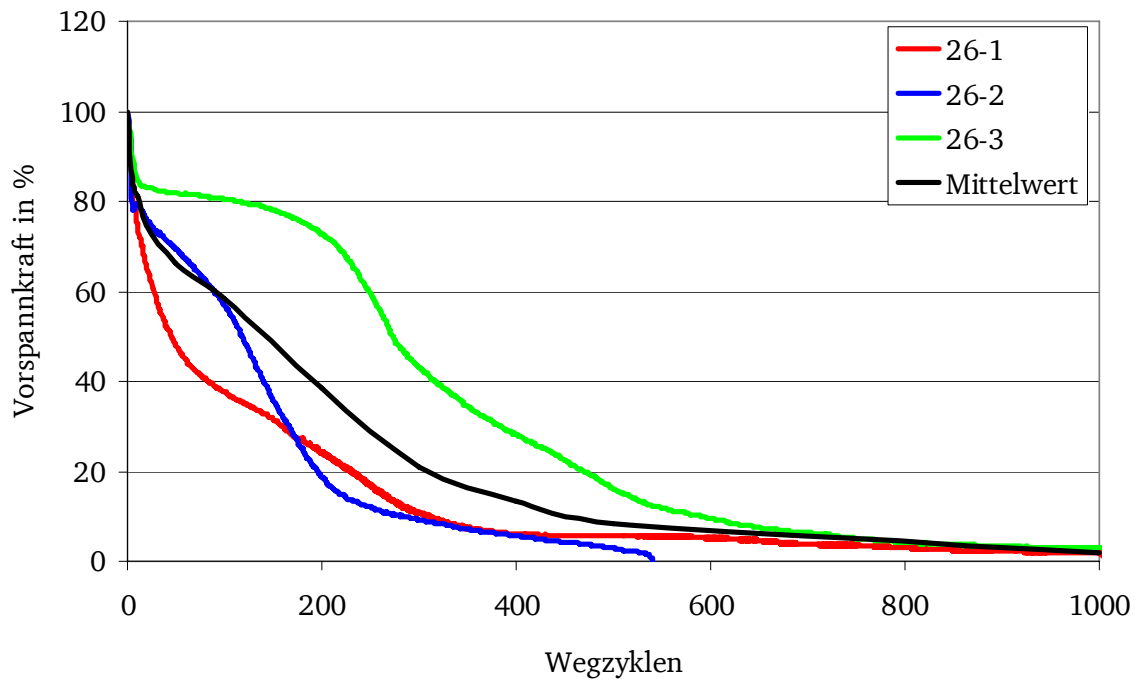


Bild 53: Versuchsergebnisse Reihe 26 in % der Anfangsvorspannkraft

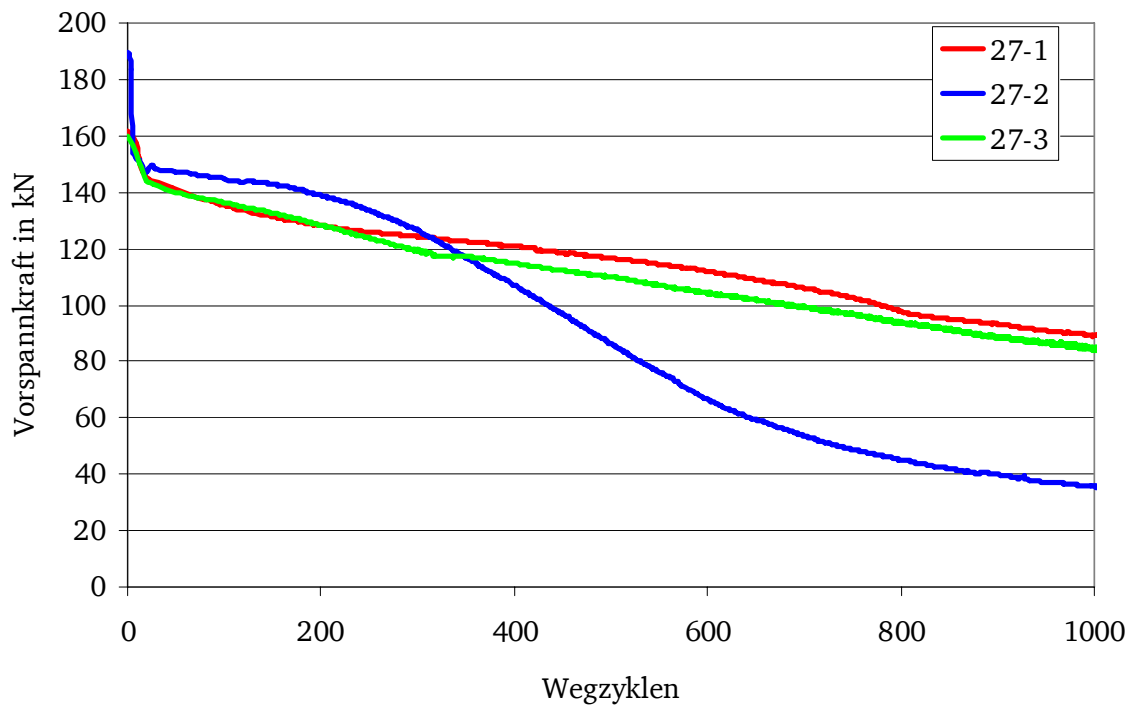


Bild 54: Versuchsergebnisse Reihe 27

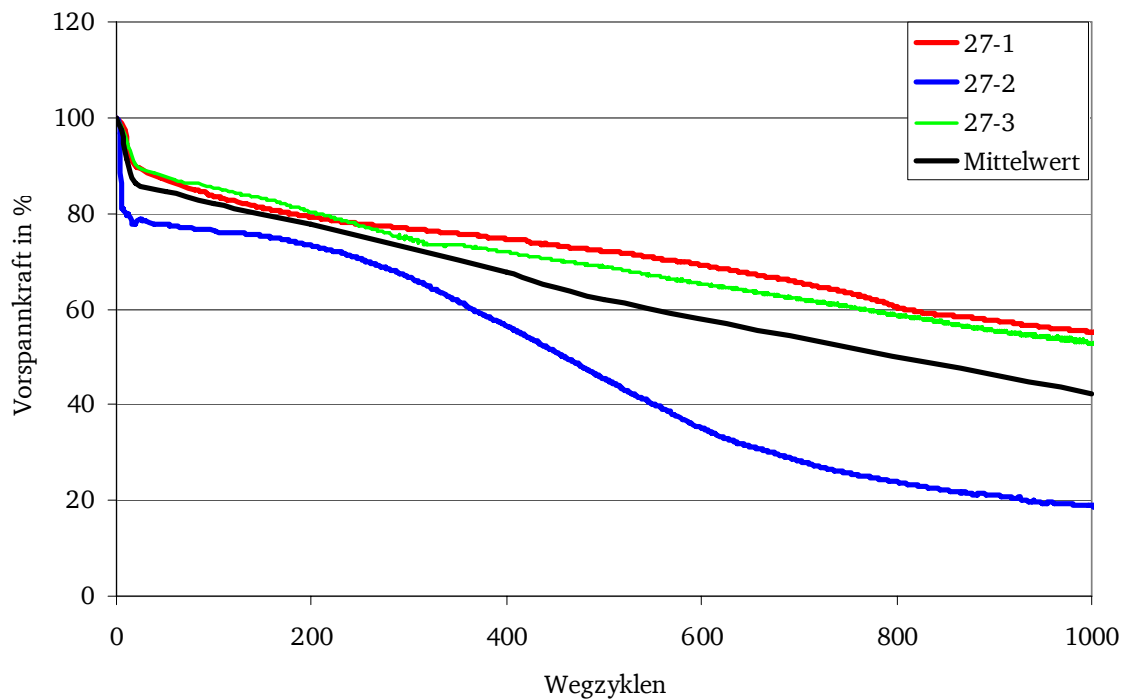


Bild 55: Versuchsergebnisse Reihe 27 in % der Anfangsvorspannkraft

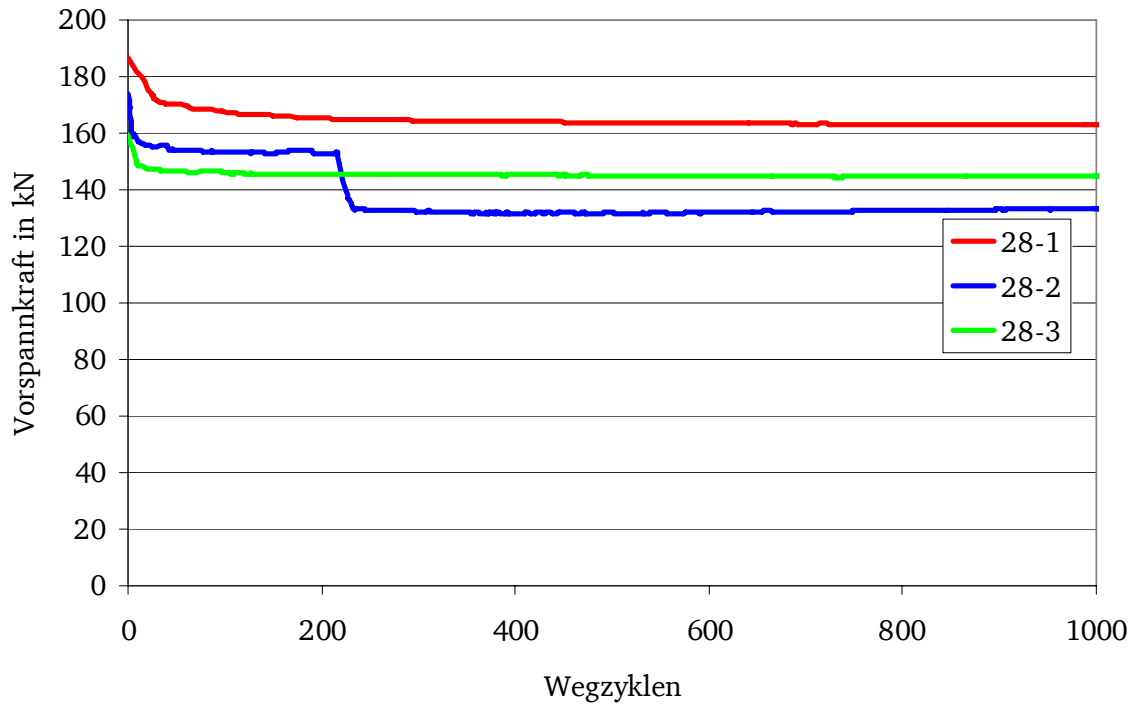


Bild 56: Versuchsergebnisse Reihe 28

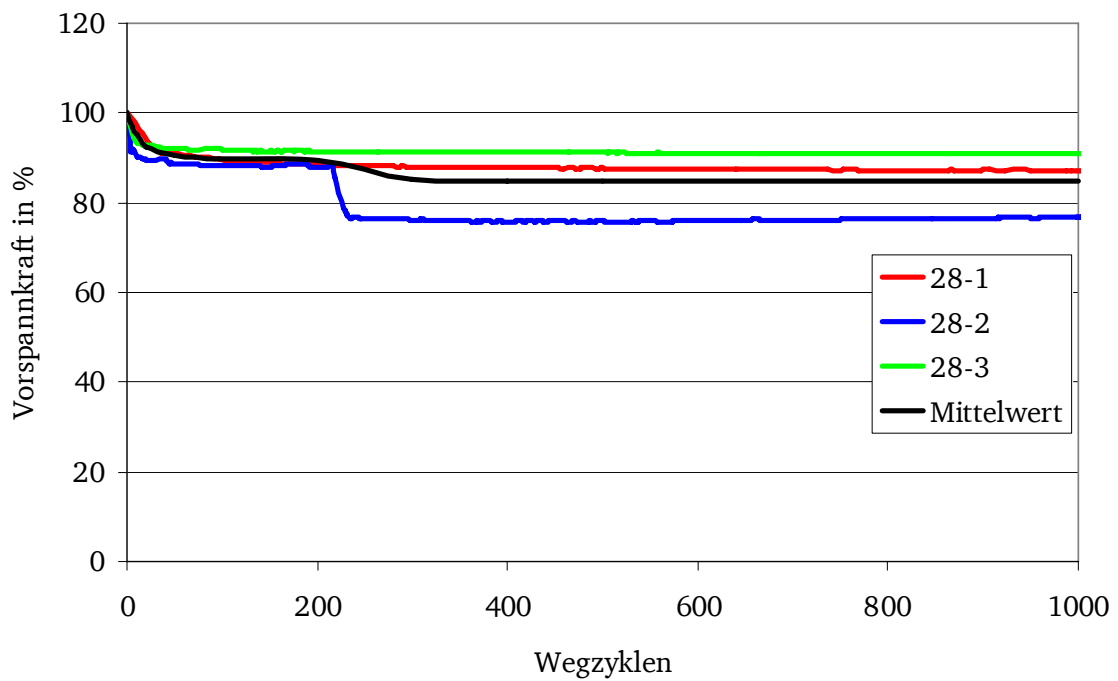
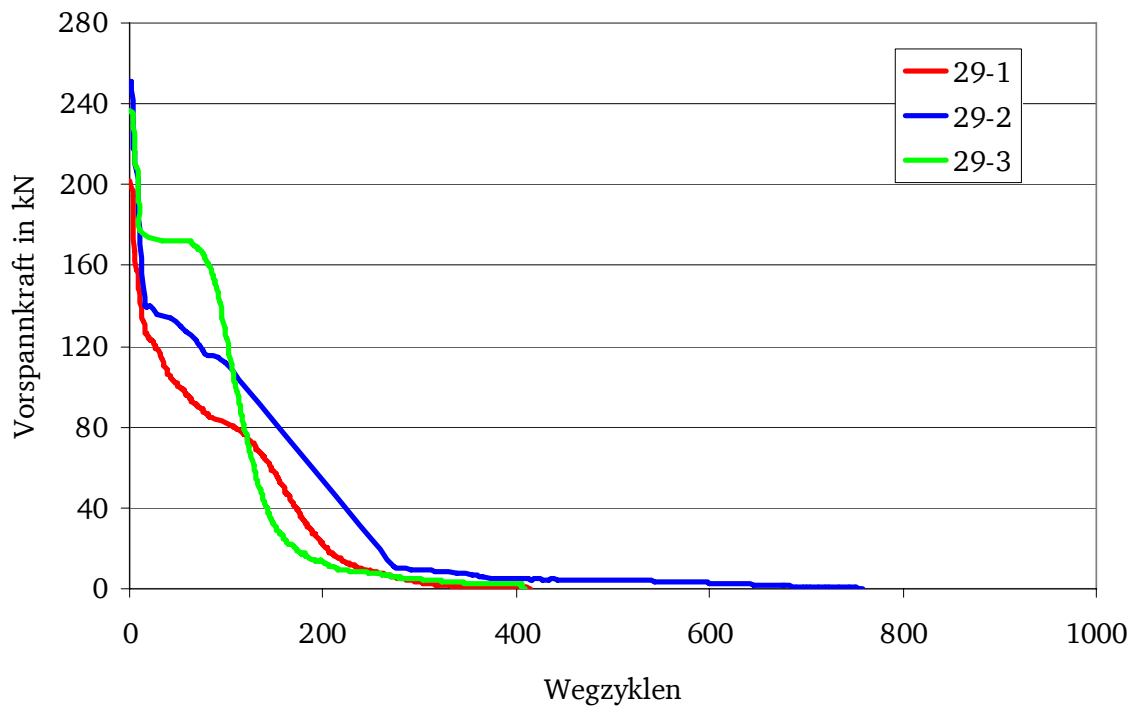
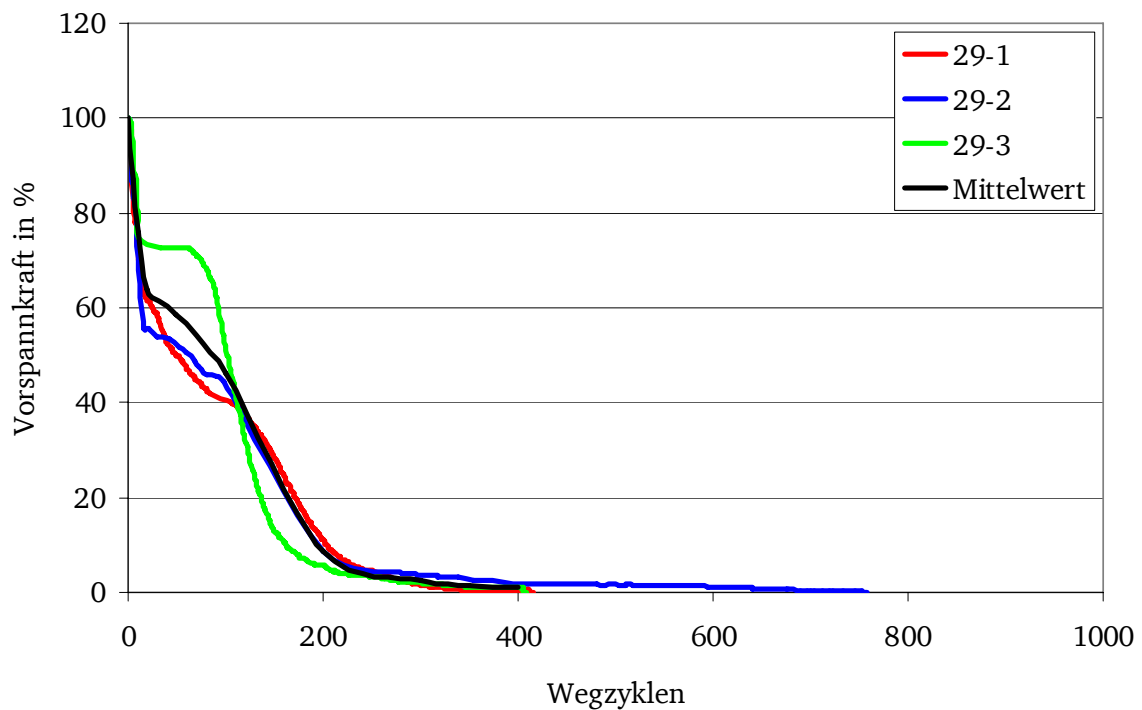


Bild 57: Versuchsergebnisse Reihe 28 in % der Anfangsvorspannkraft



**Bild 58: Versuchsergebnisse Reihe 29**



**Bild 59: Versuchsergebnisse Reihe 29 in % der Anfangsvorspannkraft**

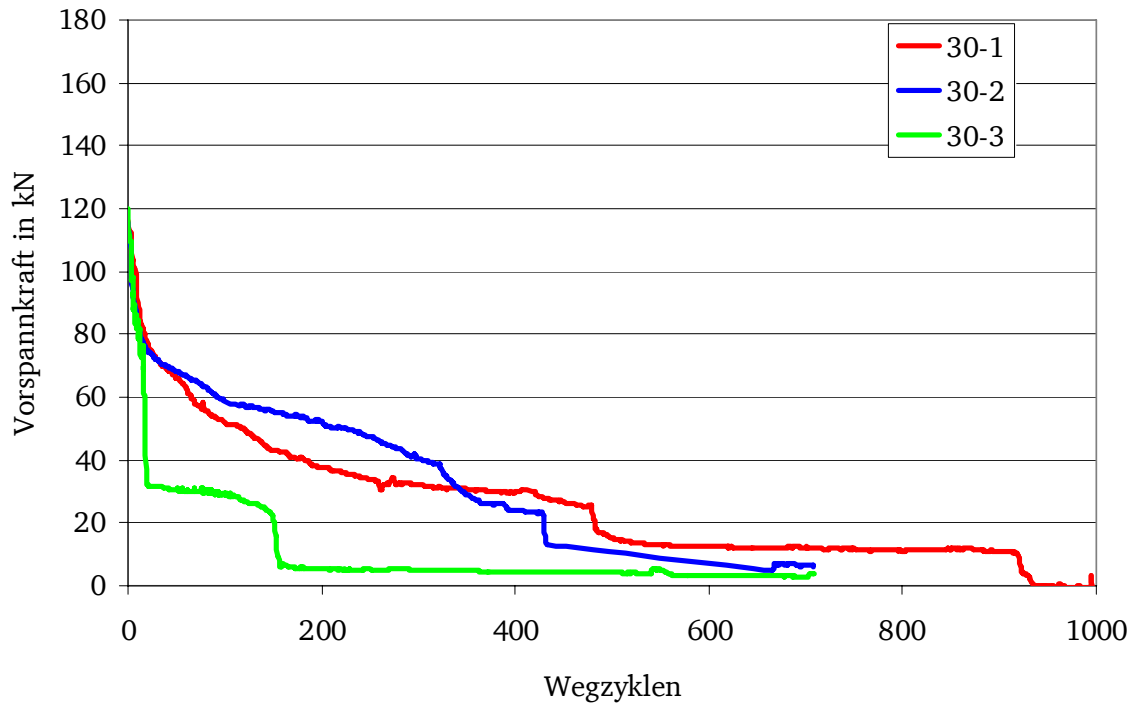


Bild 60: Versuchsergebnisse Reihe 30

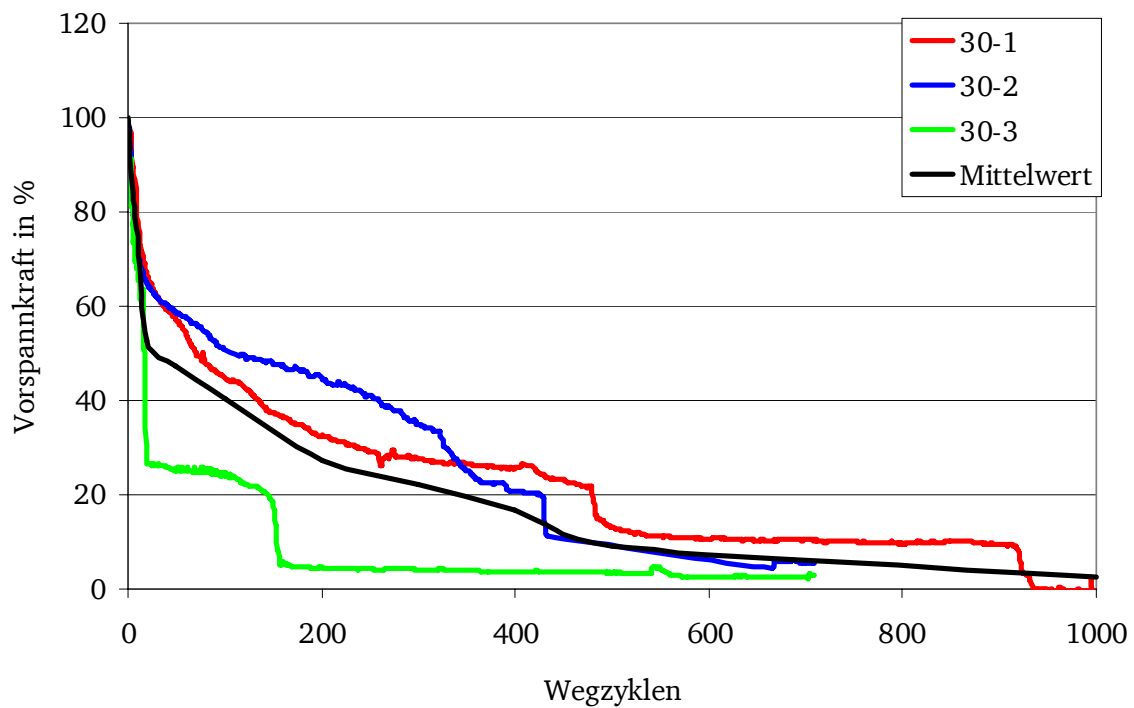


Bild 61: Versuchsergebnisse Reihe 30 in % der Anfangsvorspannkraft

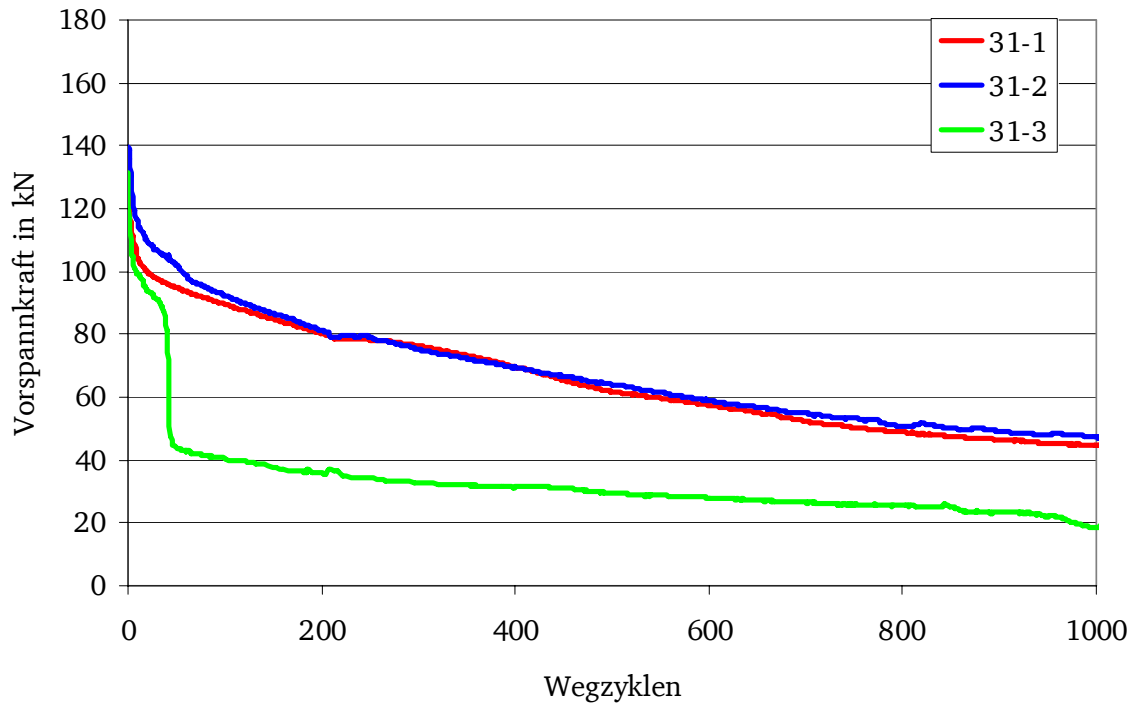


Bild 62: Versuchsergebnisse Reihe 31

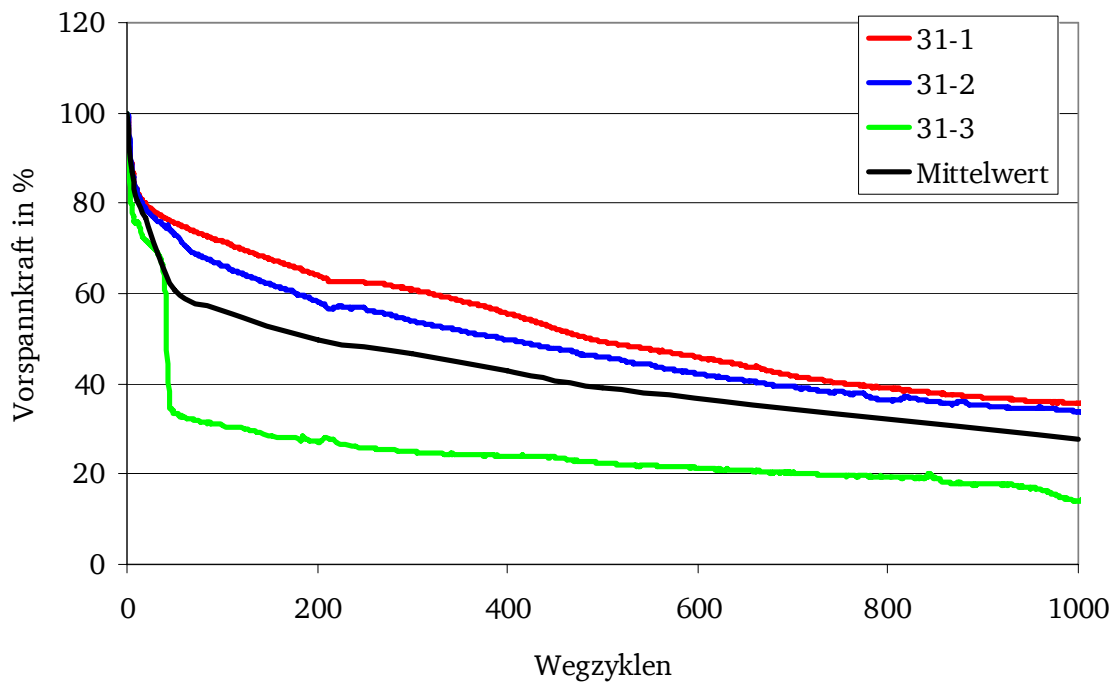


Bild 63: Versuchsergebnisse Reihe 31 in % der Anfangsvorspannkraft

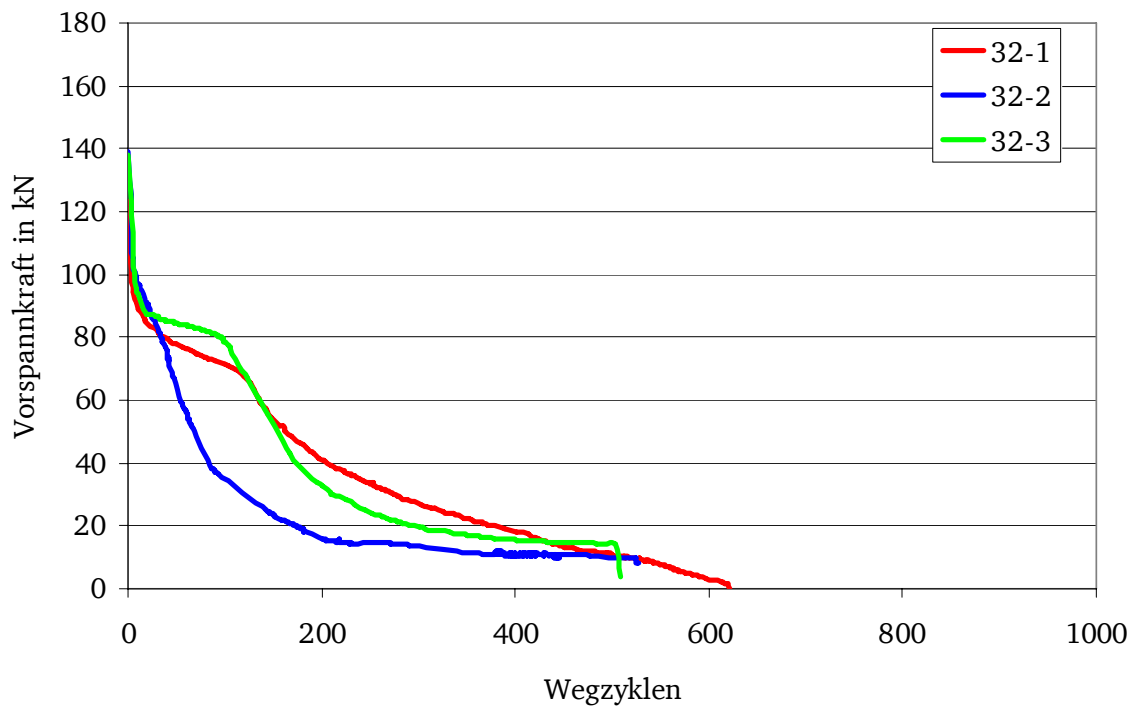


Bild 64: Versuchsergebnisse Reihe 32

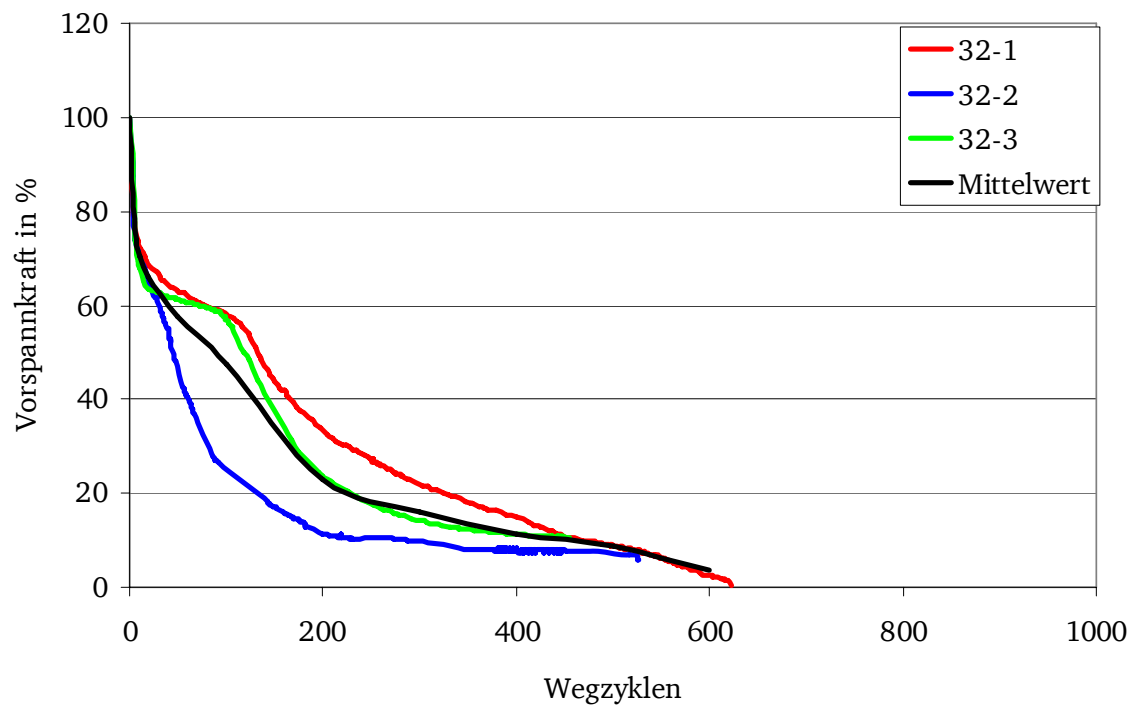


Bild 65: Versuchsergebnisse Reihe 32 in % der Anfangsvorspannkraft

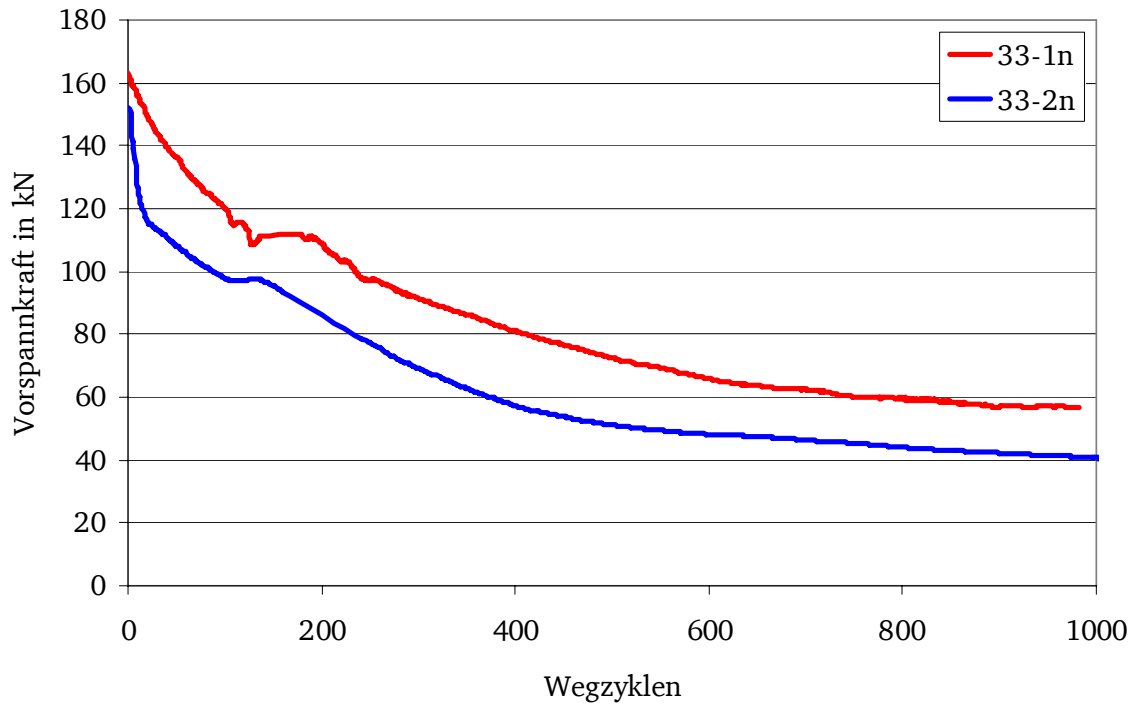


Bild 66: Versuchsergebnisse Reihe 33

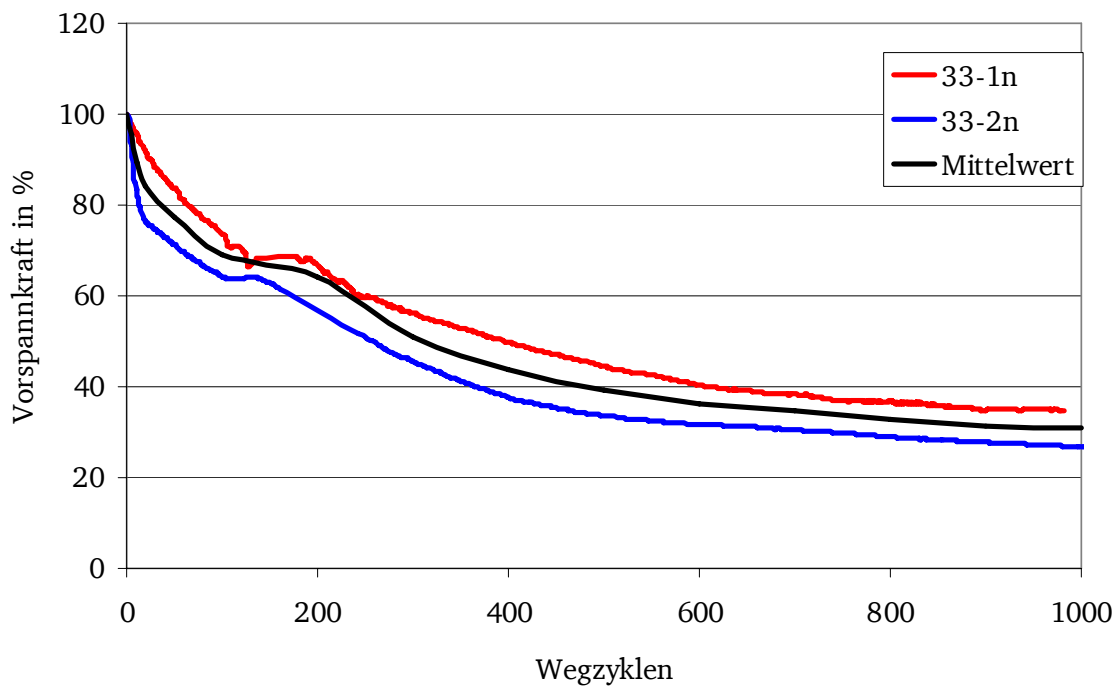


Bild 67: Versuchsergebnisse Reihe 33 in % der Anfangsvorspannkraft

---

## Anhang B

---

Im Anhang B werden die Verläufe der Verformungen über die Wegzyklen dargestellt. Dabei werden für alle Versuche die gemessenen Werte dargestellt:

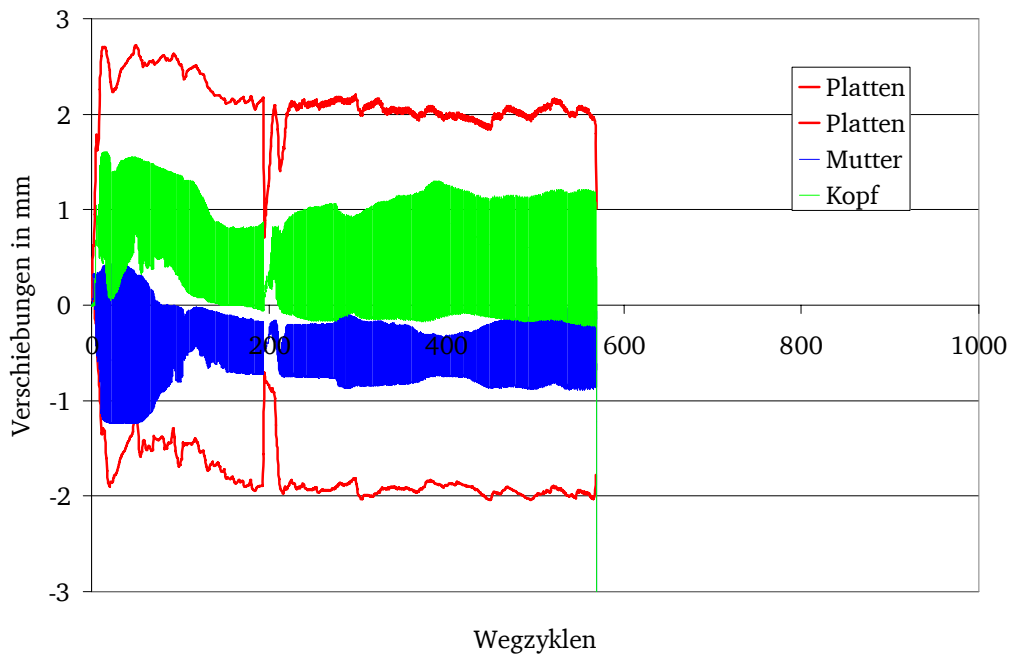
1. Maximale mittlere Relativverschiebung der Platten (Bleche)
2. Minimale mittlere Relativverschiebung der Platten (Bleche)
3. Relativverschiebung der Mutter gegen die Unterlage (Blech)
4. Relativverschiebung des Schraubenkopfes gegen die Unterlage (Blech)

Dabei ist der Begriff „Mutter“ bzw. „Kopf“ die Zusammenfassung der Trennfugen Mutter-Unterlegscheibe und Unterlegscheibe-Blech bzw. Schraubenkopf-Unterlegscheibe und Unterlegscheibe-Blech.

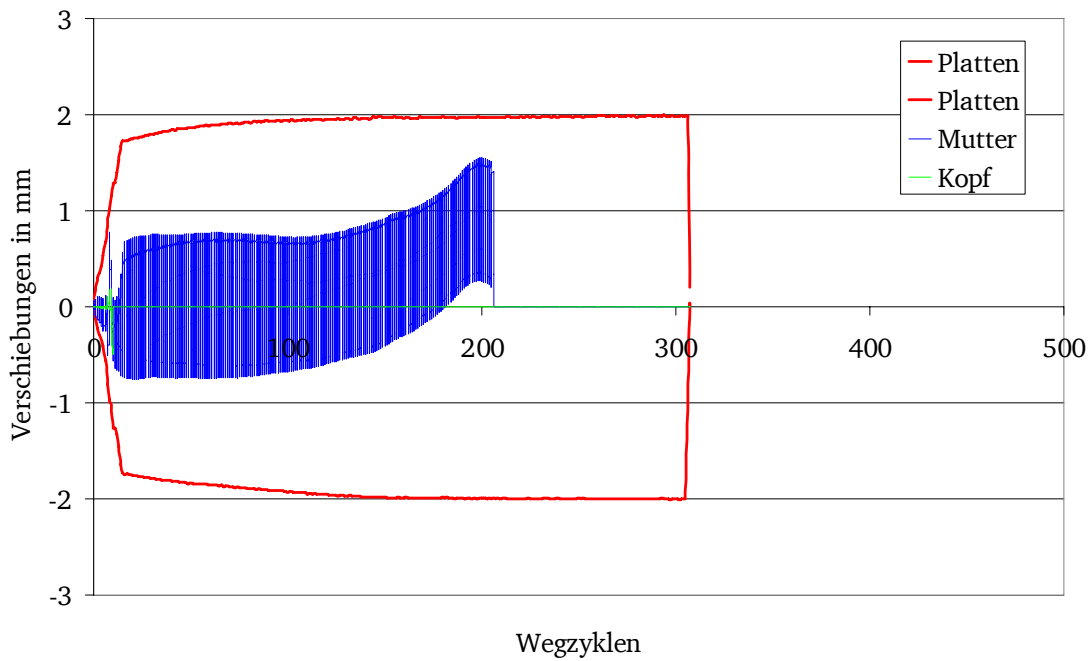
Die Relativverschiebung der Platten änderte sich im Laufe der Versuche versuchsbedingt. Sie wurde per Hand nachreguliert, was die zum Teil sehr unsauberen Relativverschiebungen erklärt. In Kapitel 3.5.2 werden die Positionen der Wegaufnehmer gezeigt. Dabei ist der Mittelweg von Wegaufnehmer Nr. 1 und 2 die Relativverschiebung der Platten, Wegaufnehmer Nr. 3 die Verschiebung der Mutter, Wegaufnehmer Nr. 4 die Verschiebung des Schraubenkopfes.

Bei den Versuchen der Reihe 2 bis 4, sowie dem Versuch 1-2 lag der Wegaufnehmer direkt auf der Mutter und dem Schraubenkopf auf. Aufgrund der Sechskantform läuft die Verschiebung langsam weg. Dieser ungewollte Effekt wurde bei späteren Versuchen durch das Aufbringen einer Rohrschelle behoben.

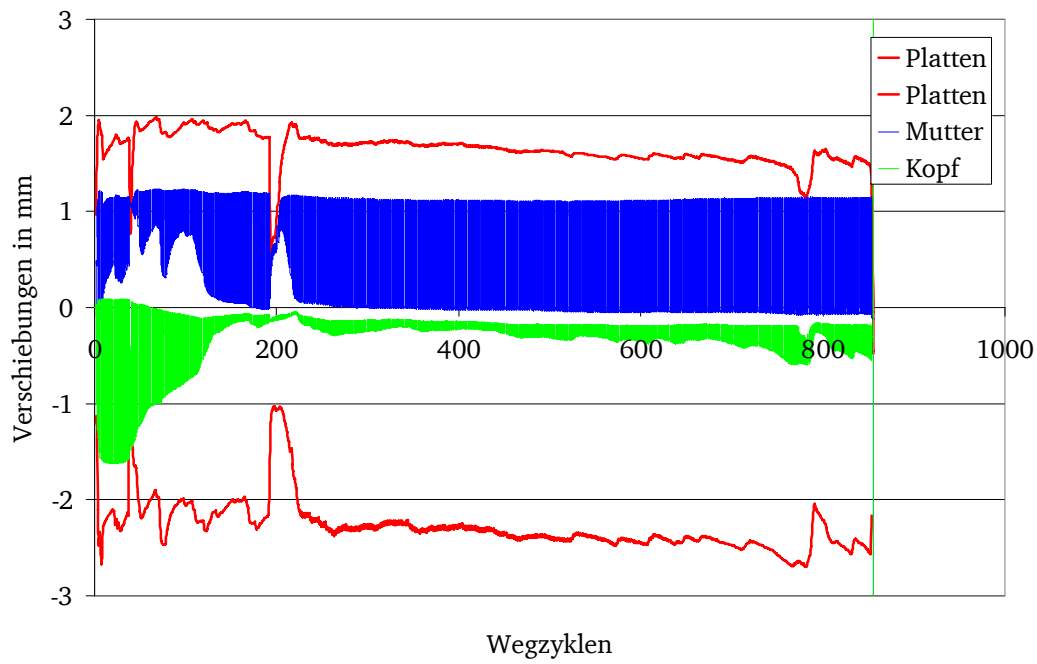
Bei z.B. Bild 1 findet bei ca. 200 Wegzyklen eine Einschnürung der Verformungen statt. Diese wird durch die Vergrößerung der gefahrenen Versuchsfrequenz verursacht. Dadurch wird der Vers Schubweg (weggesteuerte Versuche) kurzfristig reduziert.



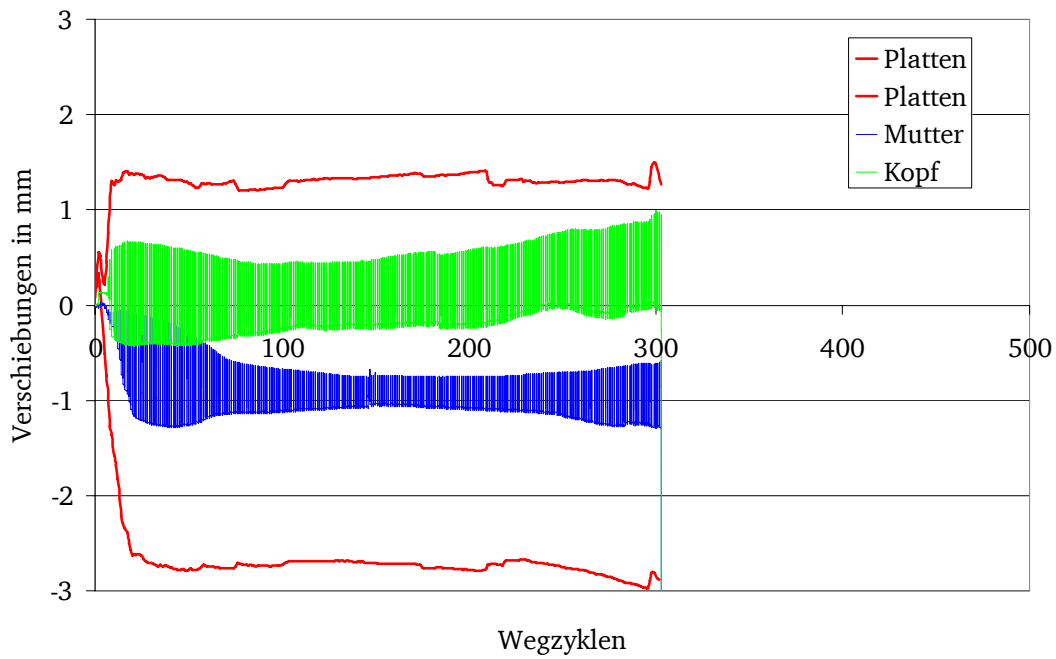
**Bild 1: Verschiebungen Versuch 1-1n**



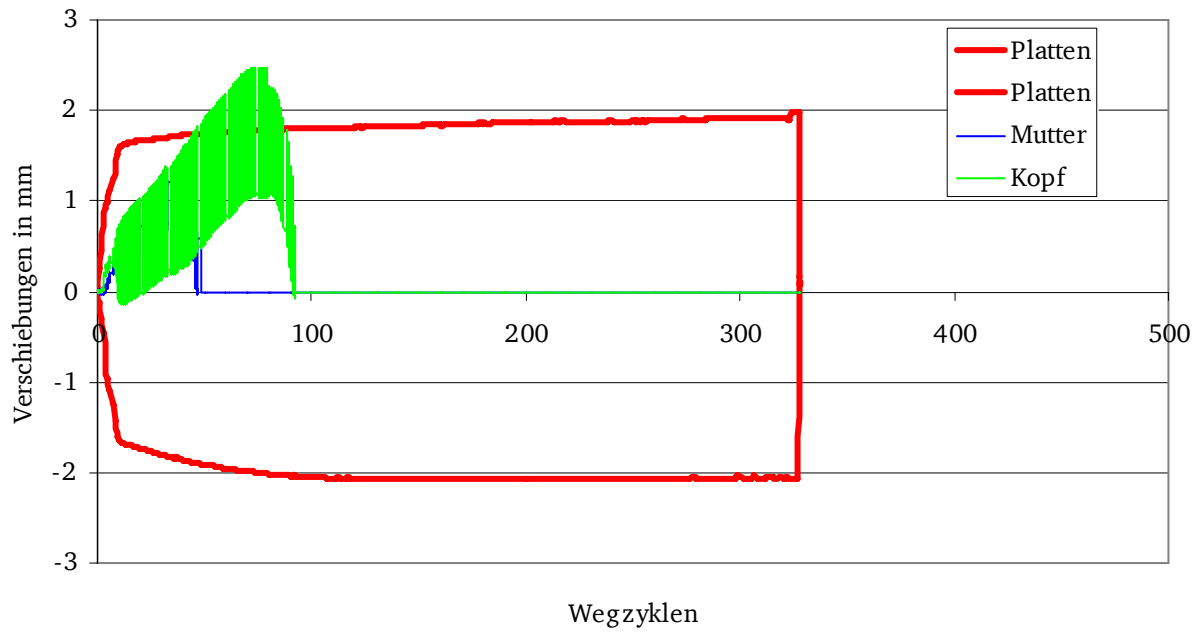
**Bild 2: Verschiebungen Versuch 1-2**



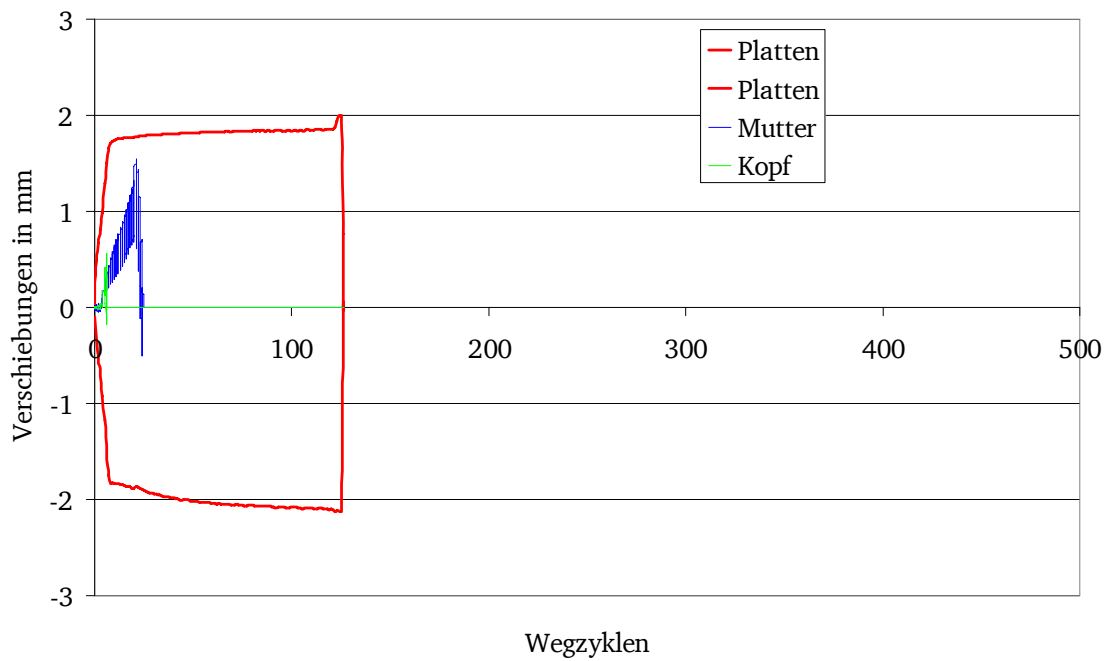
**Bild 3: Verschiebungen Versuch 1-2n**



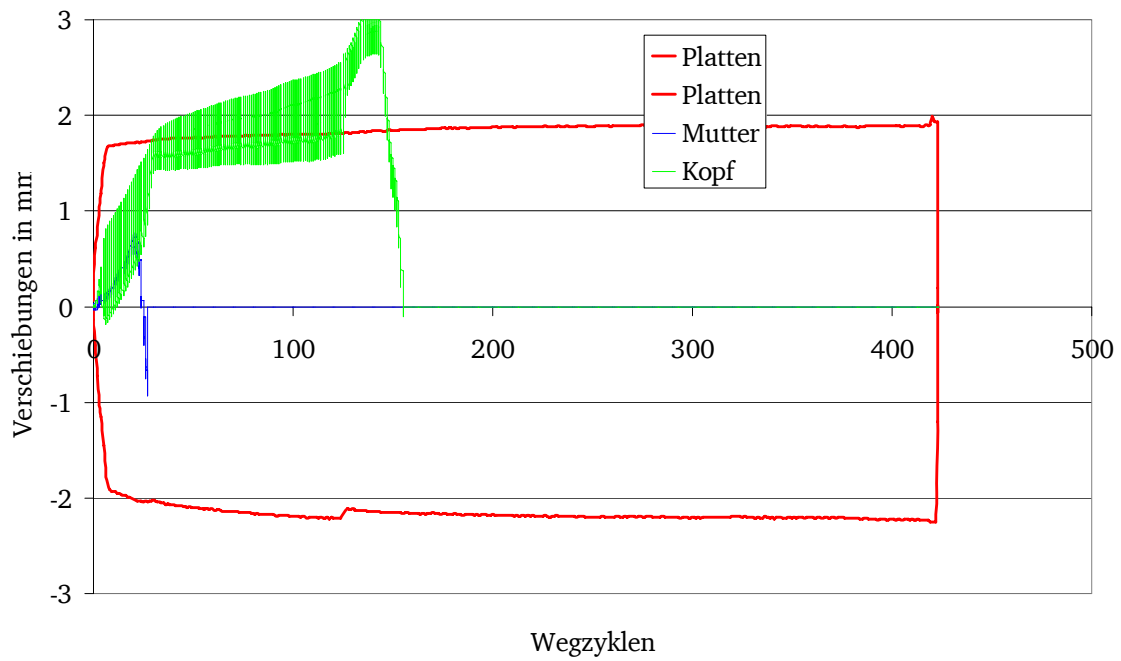
**Bild 4: Verschiebungen Versuch 1-3n**



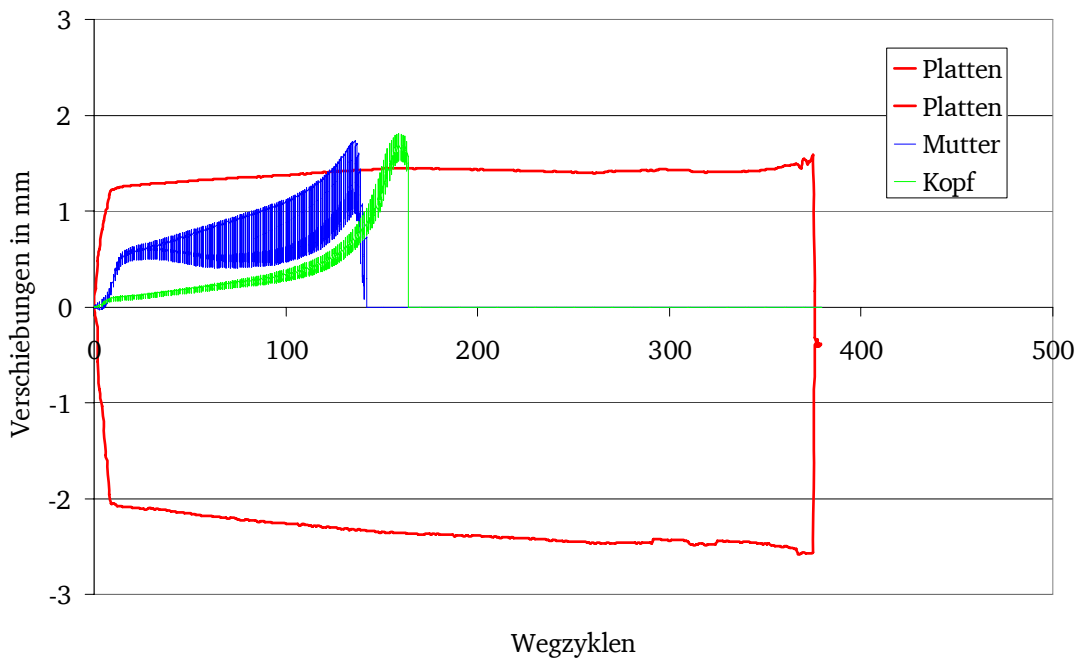
**Bild 5: Verschiebungen Versuch 2-1**



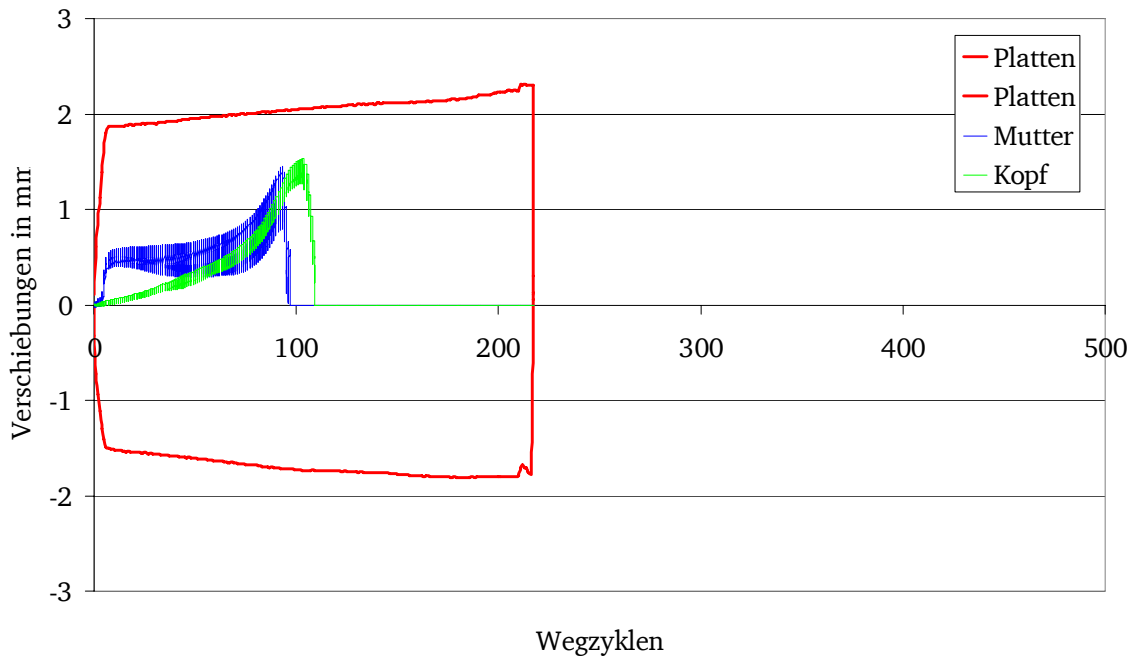
**Bild 6: Verschiebungen Versuch 2-2**



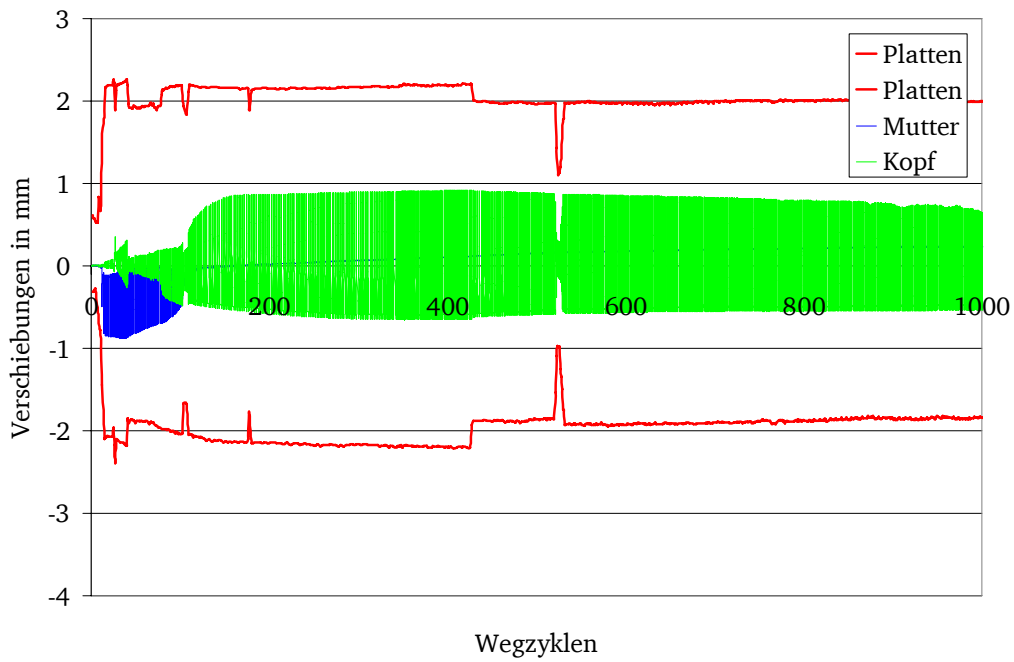
**Bild 7: Verschiebungen Versuch 2-3**



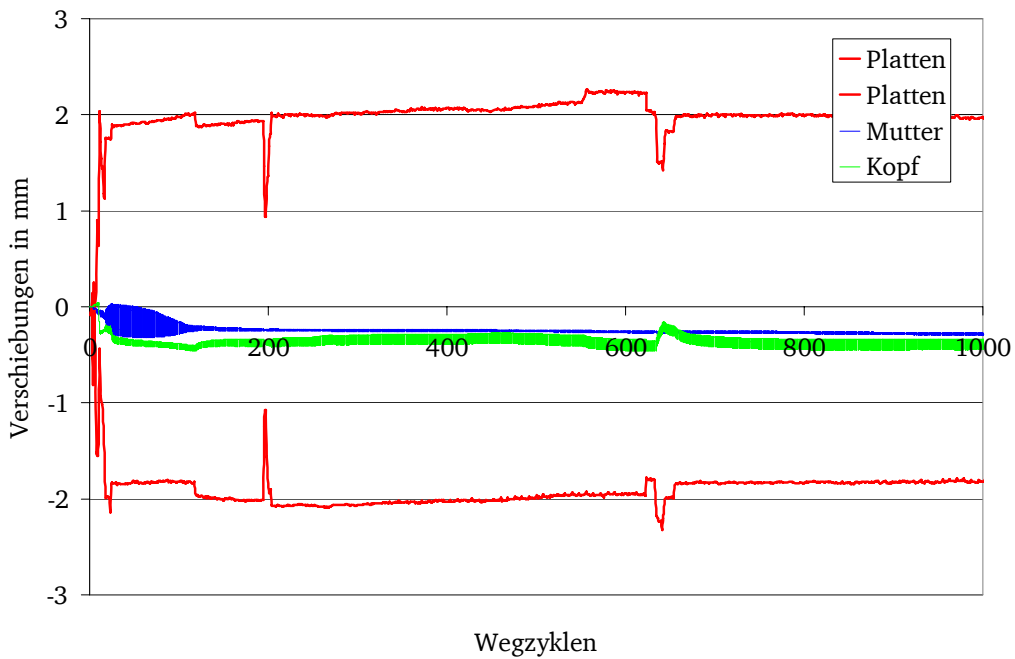
**Bild 8: Verschiebungen Versuch 3-2**



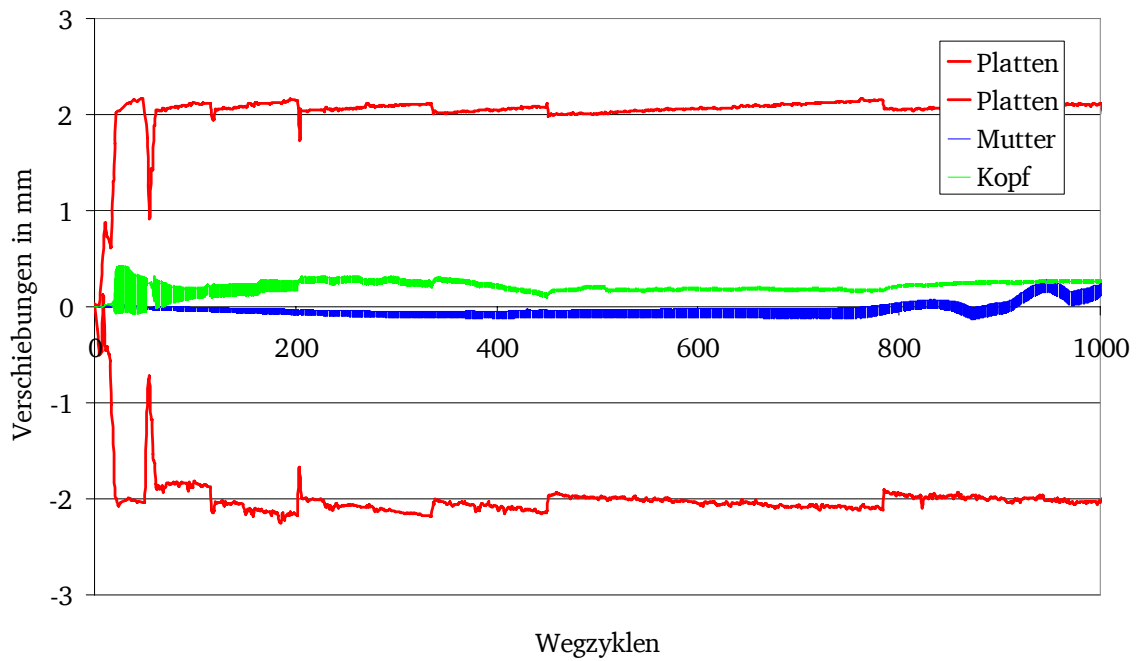
**Bild 9: Verschiebungen Versuch 3-3**



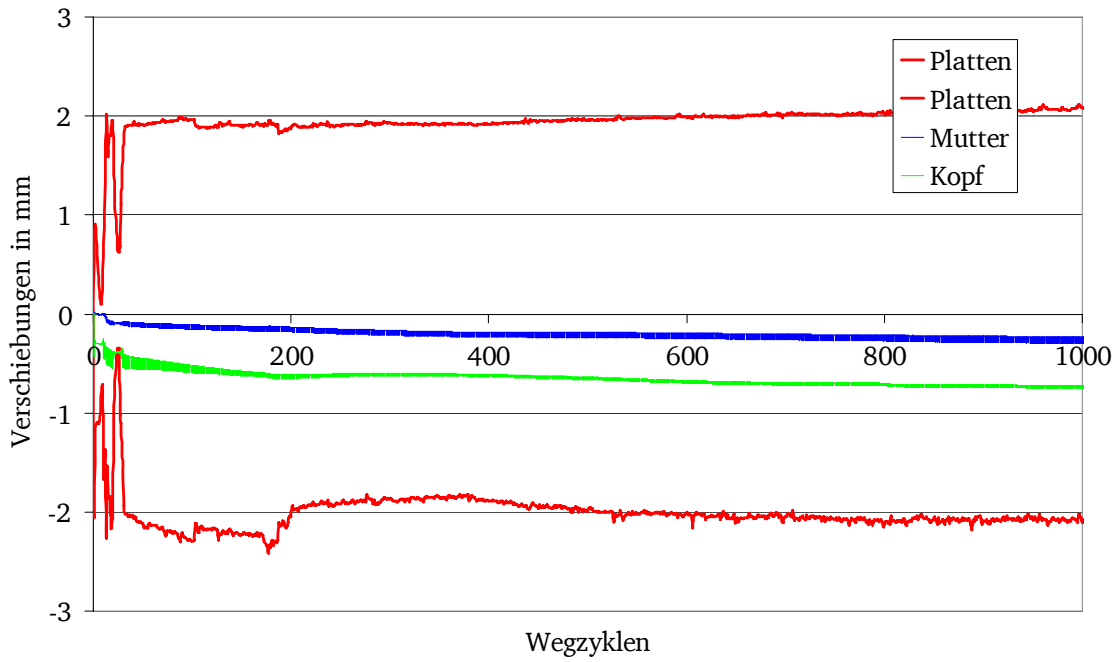
**Bild 10: Verschiebungen Versuch 4-2**



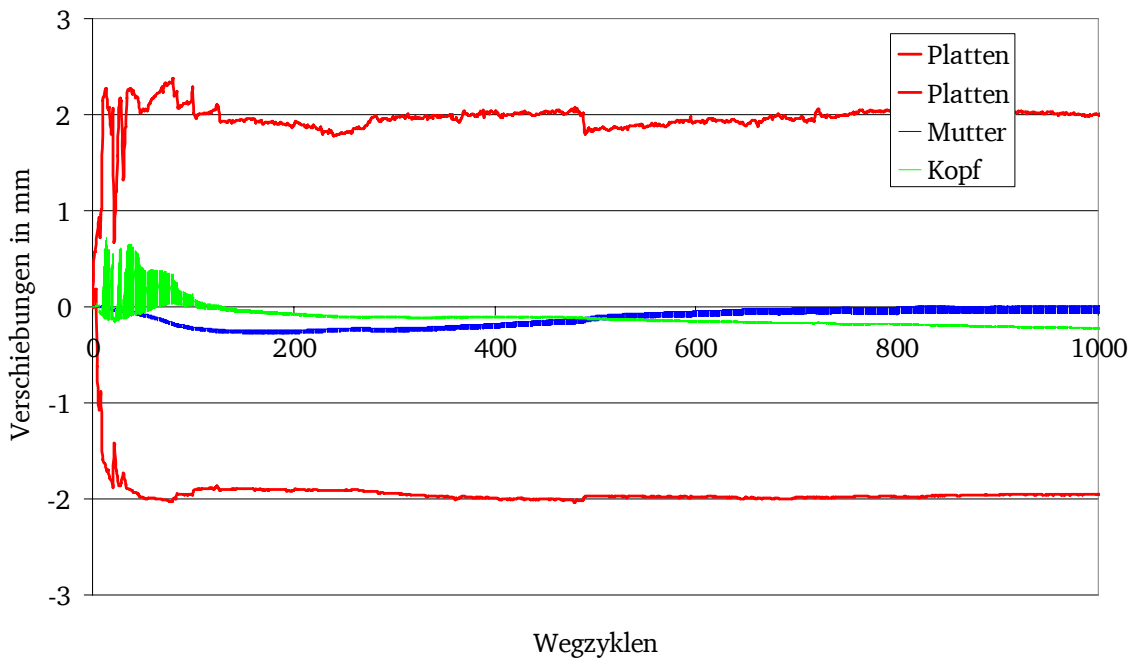
**Bild 11: Verschiebungen Versuch 4-3**



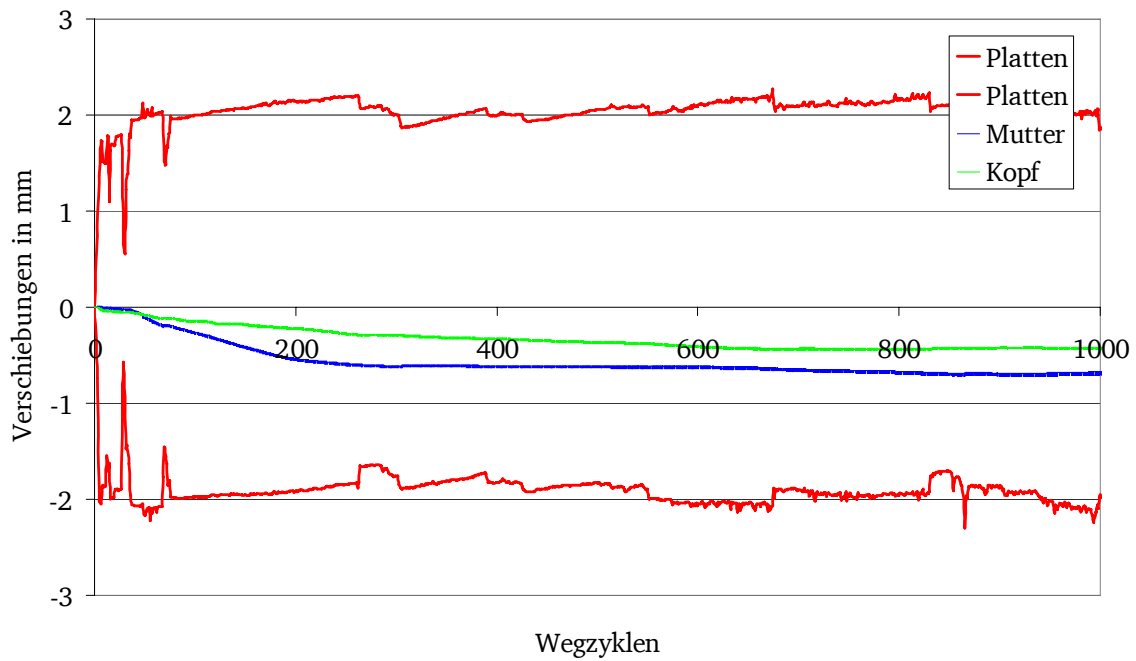
**Bild 12: Verschiebungen Versuch 5-1**



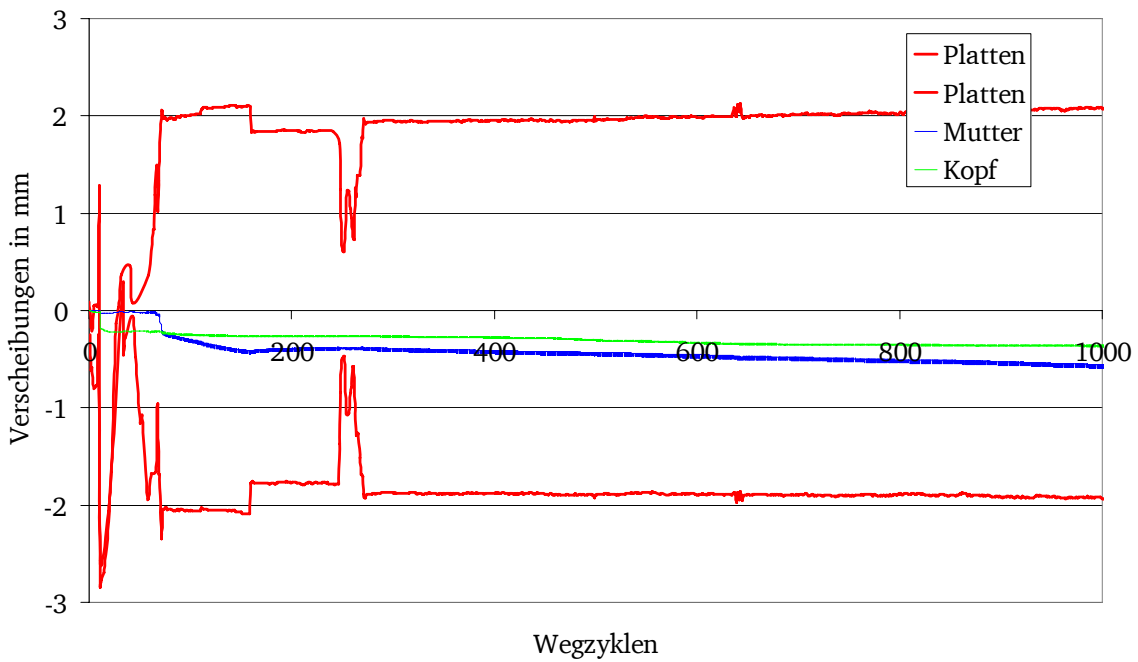
**Bild 13: Verschiebungen Versuch 5-2**



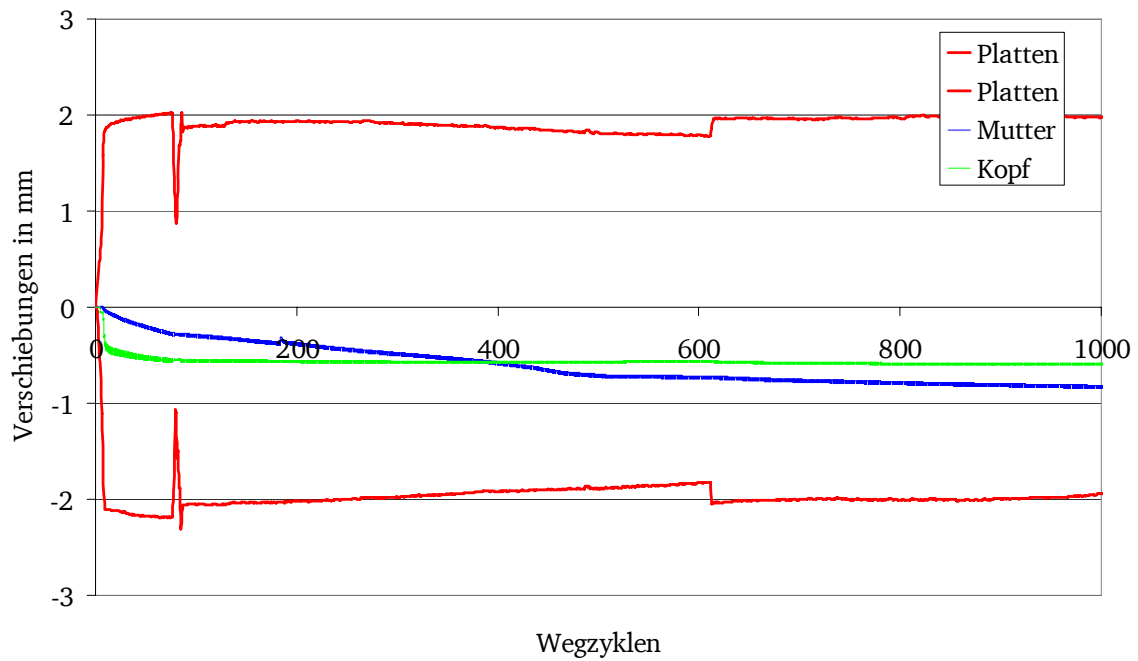
**Bild 14: Verschiebungen Versuch 5-3**



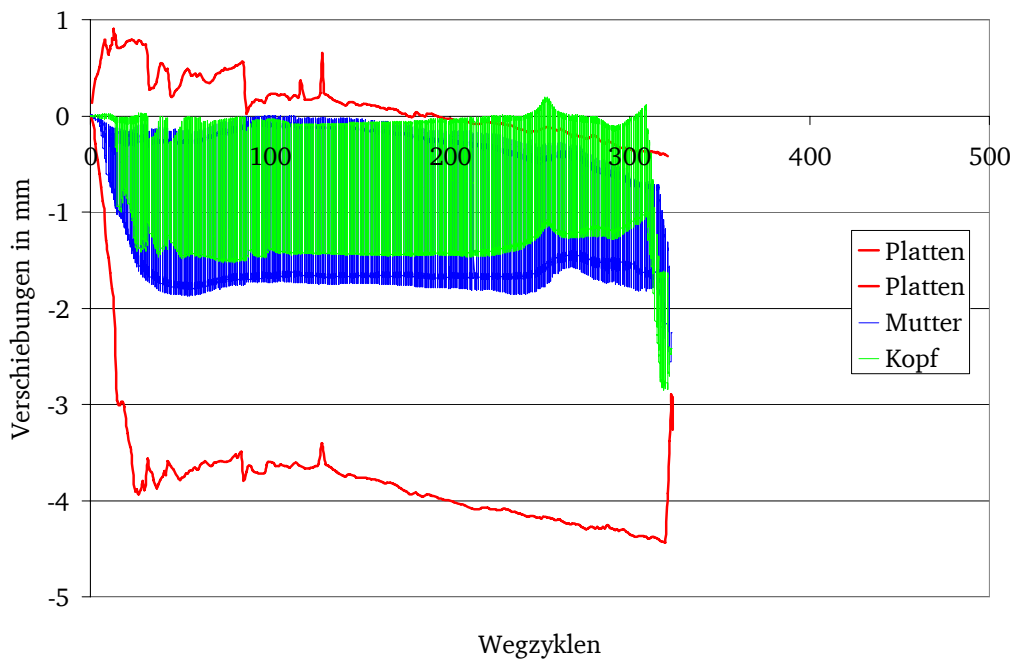
**Bild 15: Verschiebungen Versuch 6-1**



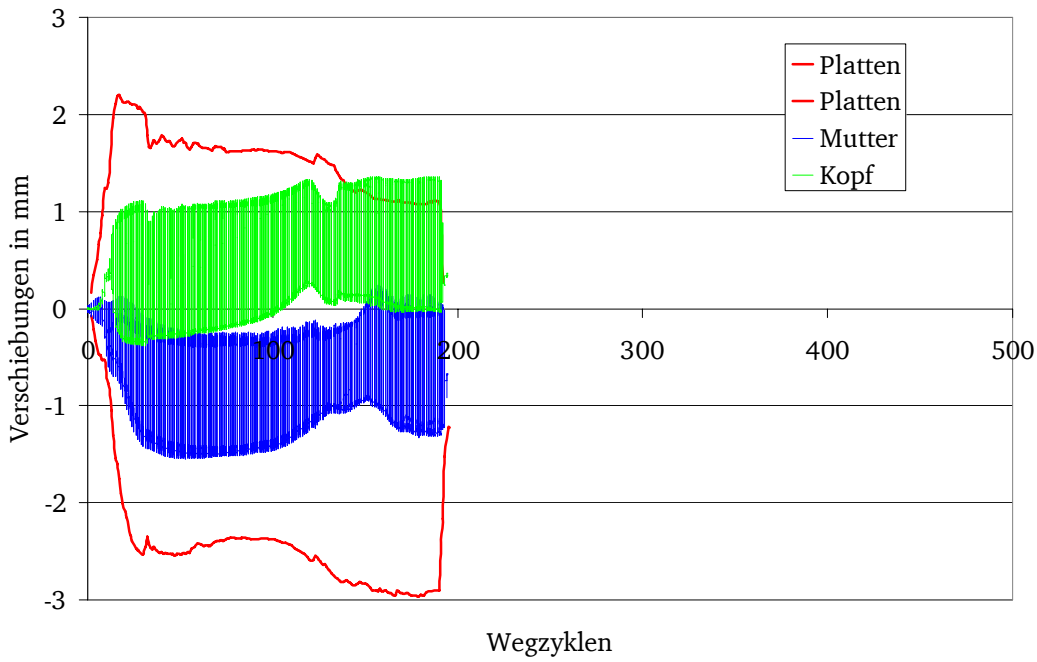
**Bild 16: Verschiebungen Versuch 6-2**



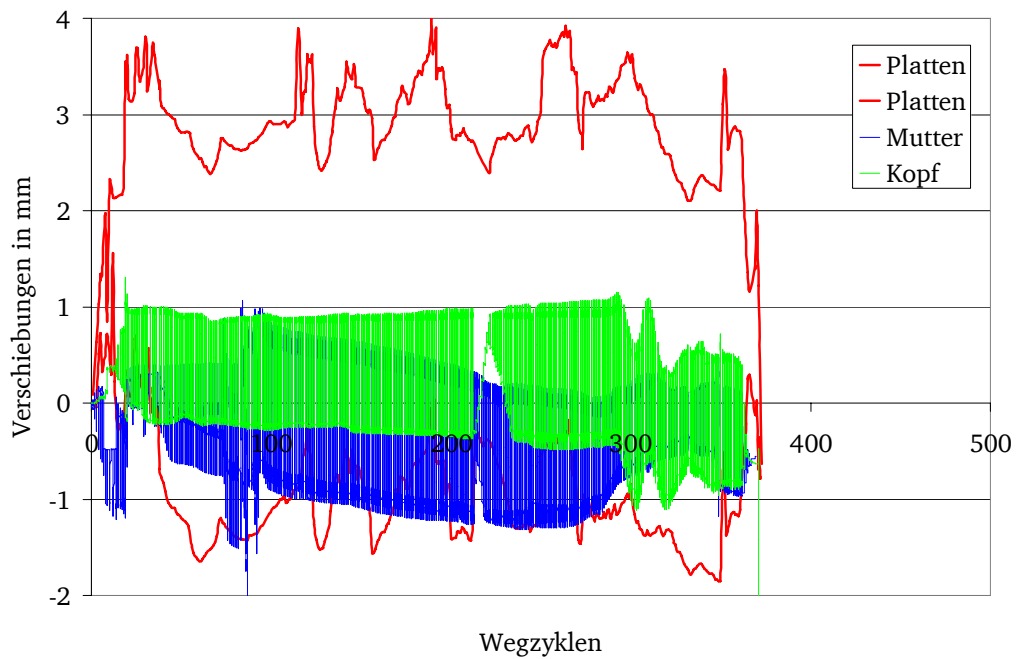
**Bild 17: Verschiebungen Versuch 6-3**



**Bild 18: Verschiebungen Versuch 7-1**



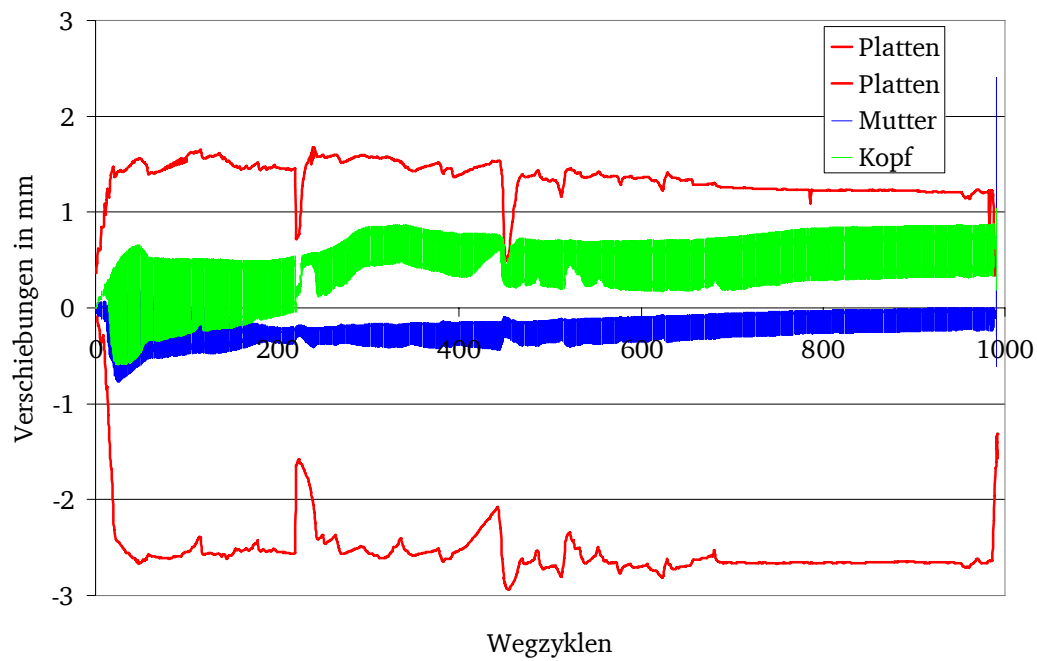
**Bild 19: Verschiebungen Versuch 7-2**



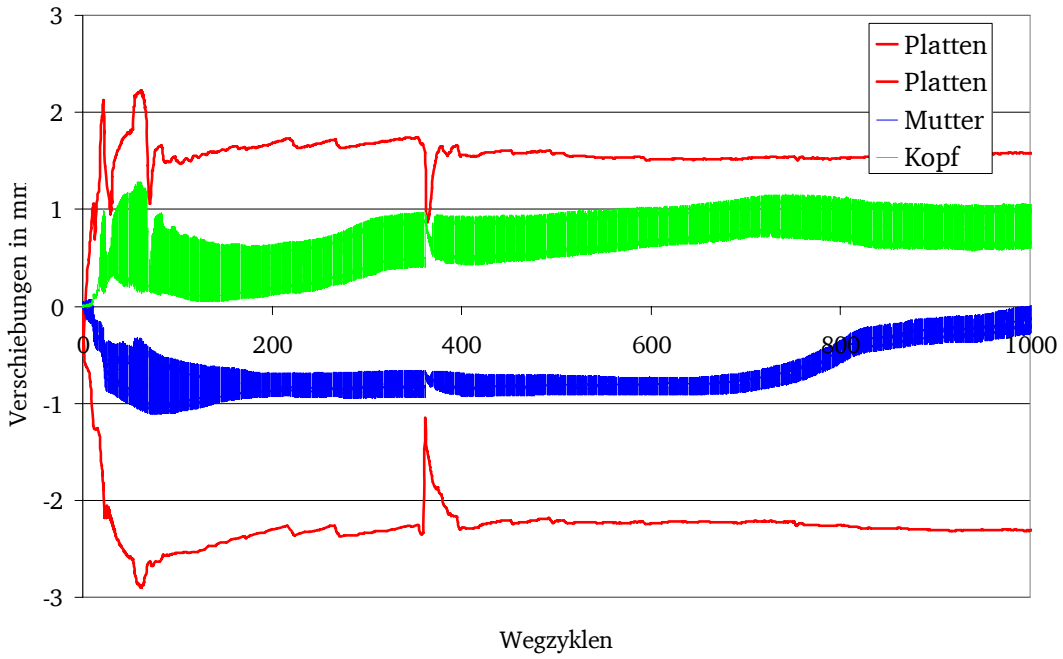
**Bild 20: Verschiebungen Versuch 7-3n**



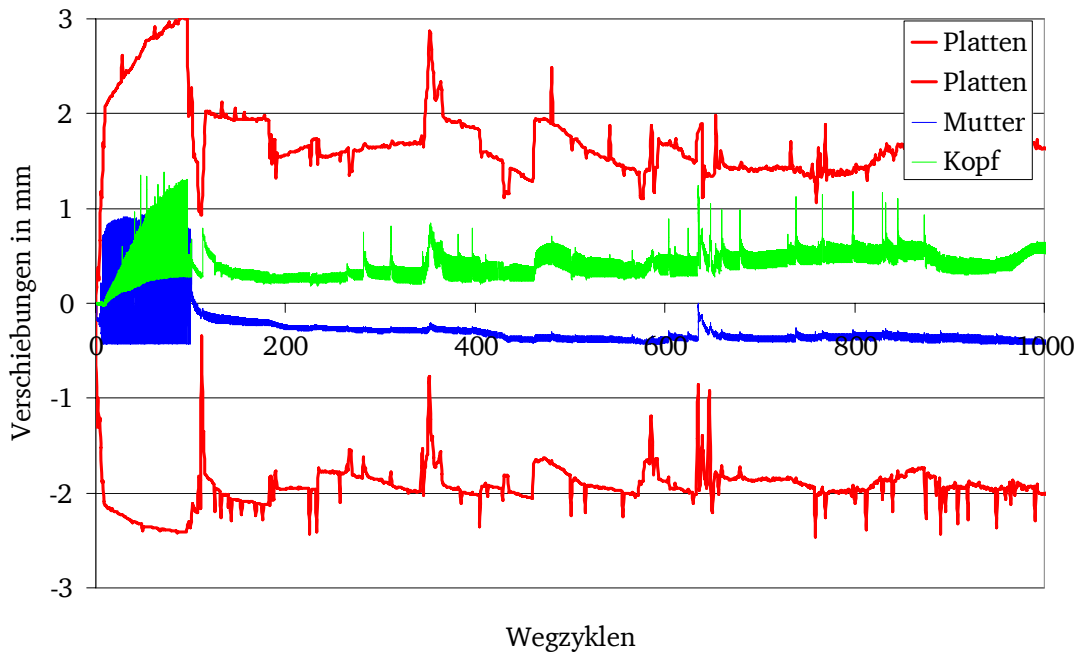
**Bild 21: Verschiebungen Versuch 8-1**



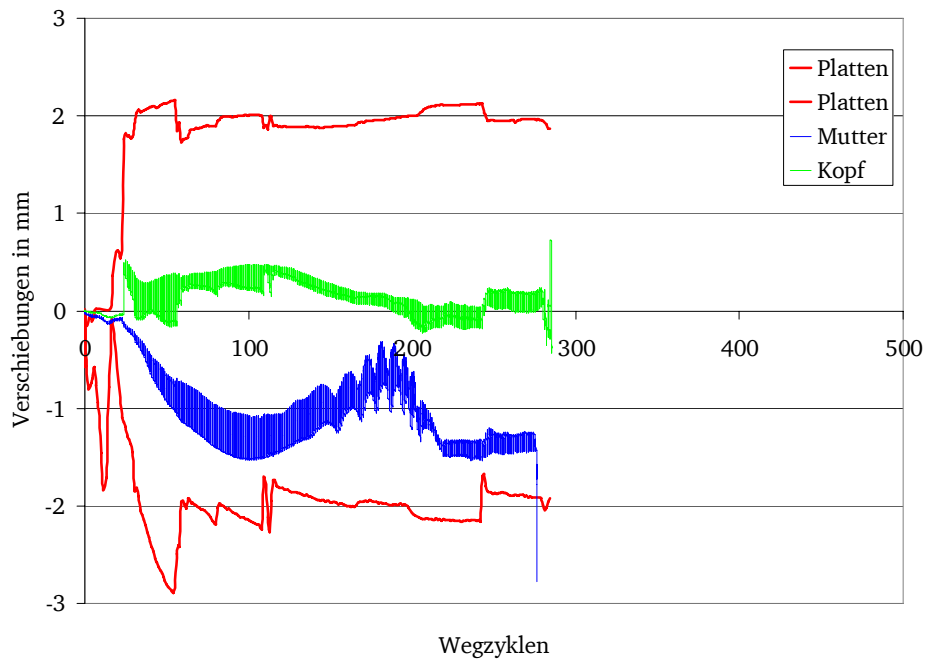
**Bild 22: Verschiebungen Versuch 8-2**



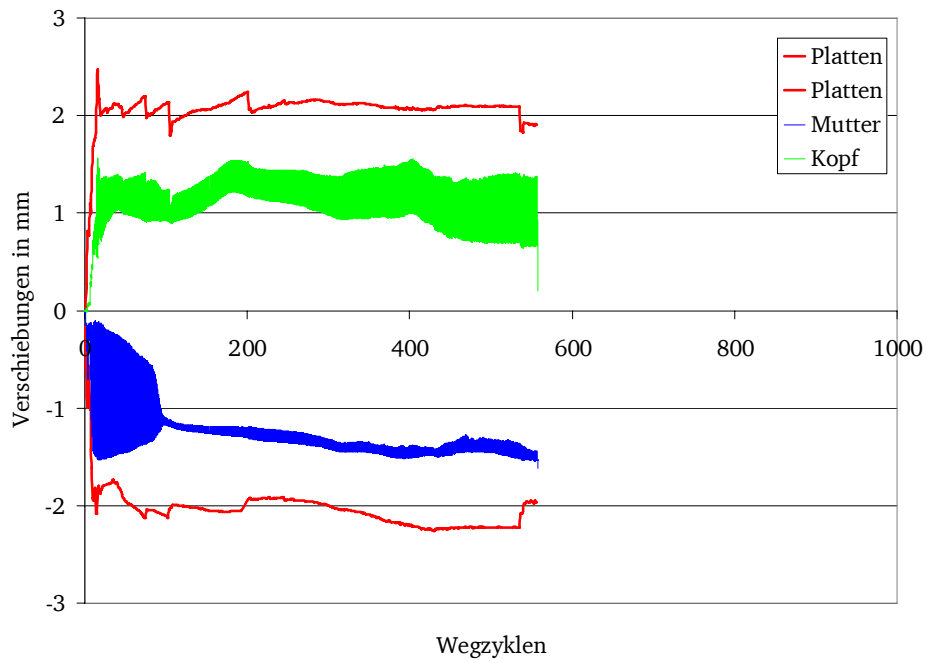
**Bild 23: Verschiebungen Versuch 8-3**



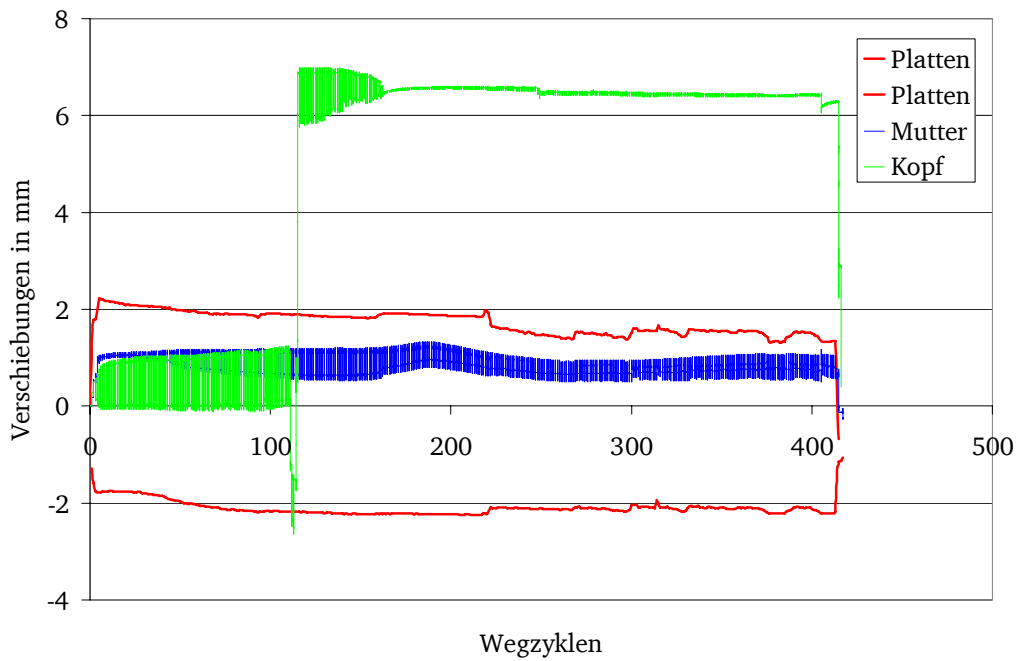
**Bild 24: Verschiebungen Versuch 9-1**



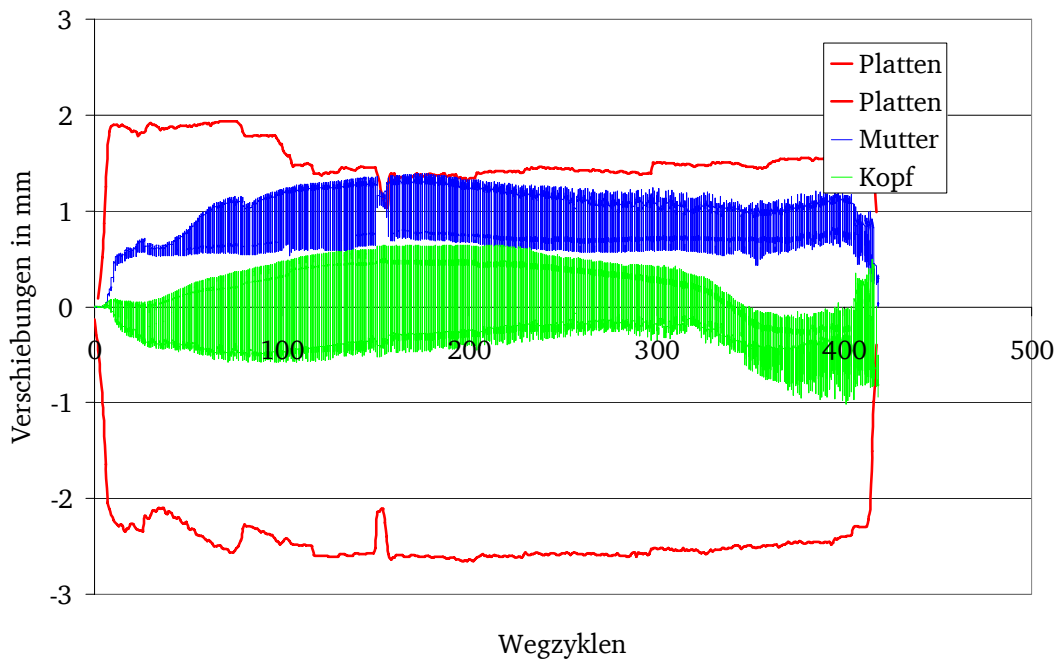
**Bild 25: Verschiebungen Versuch 9-2**



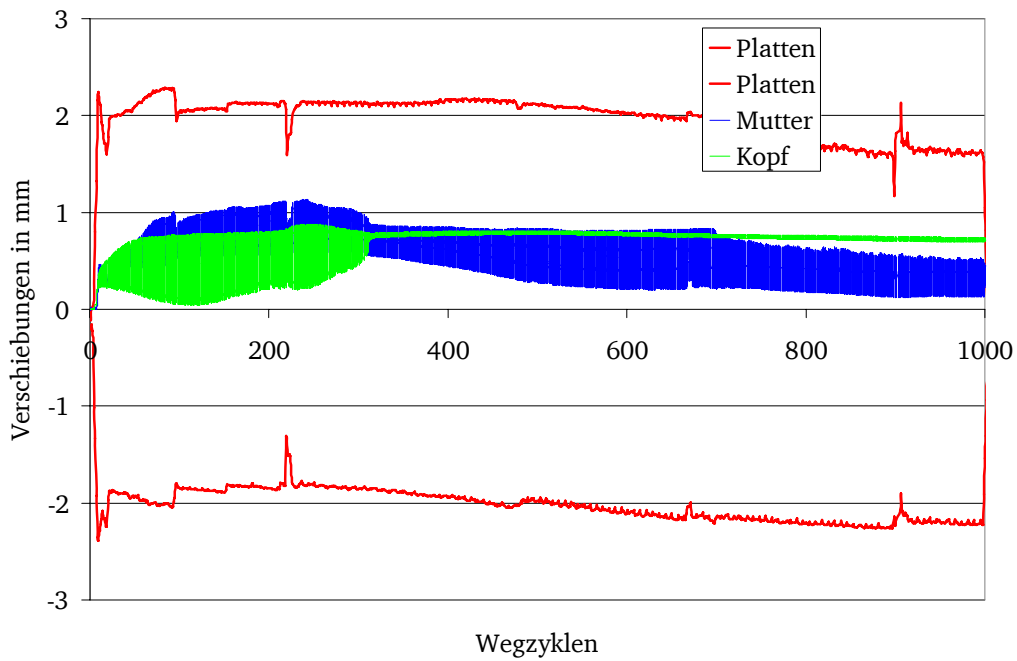
**Bild 26: Verschiebungen Versuch 9-3**



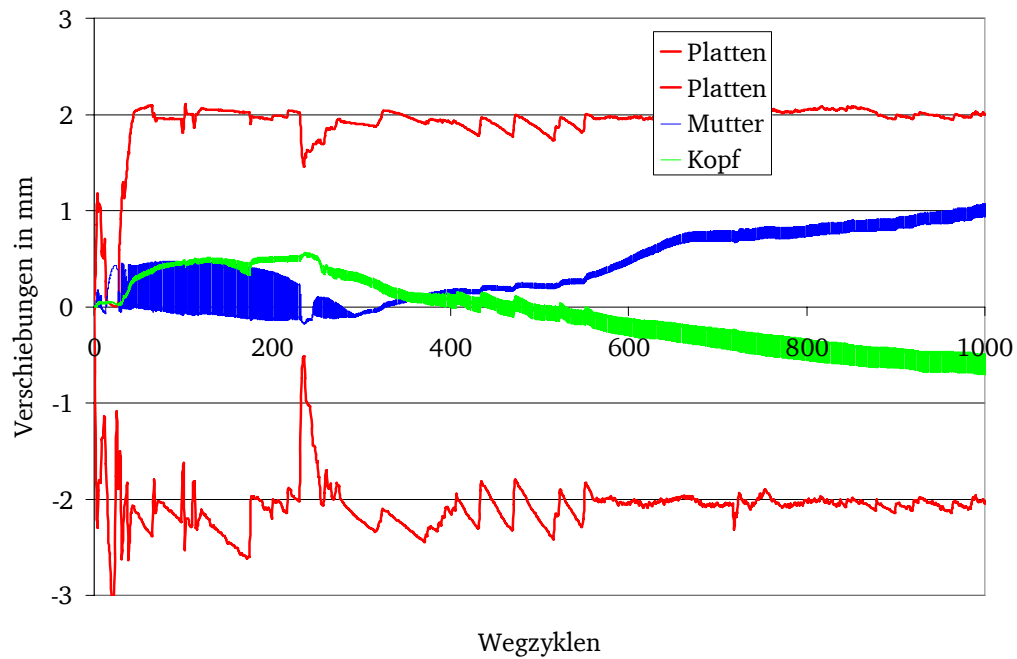
**Bild 27: Verschiebungen Versuch 10-1**



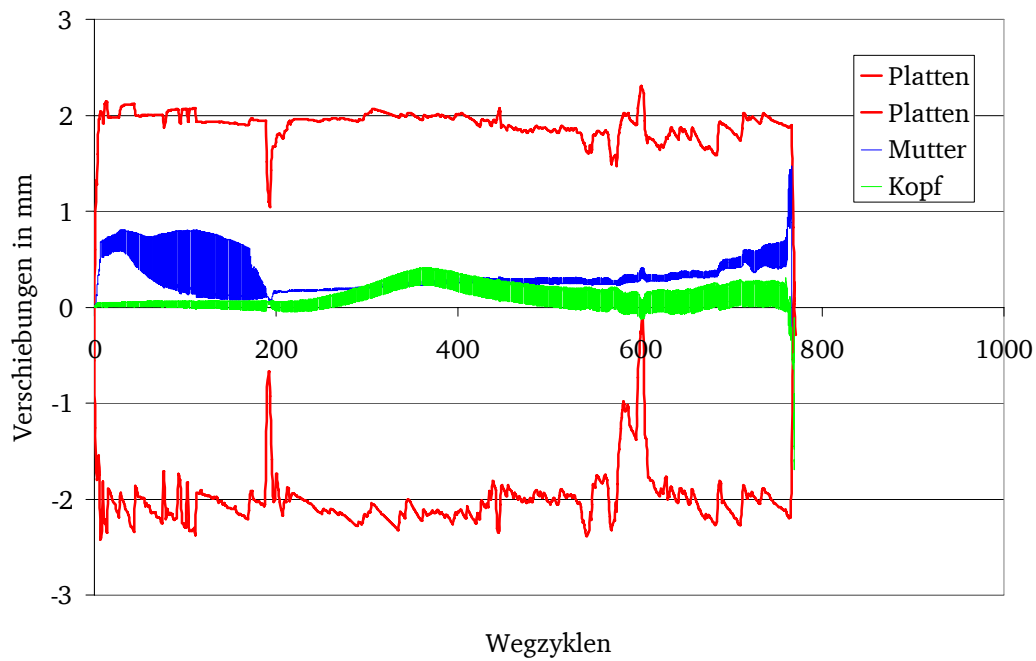
**Bild 28: Verschiebungen Versuch 10-2**



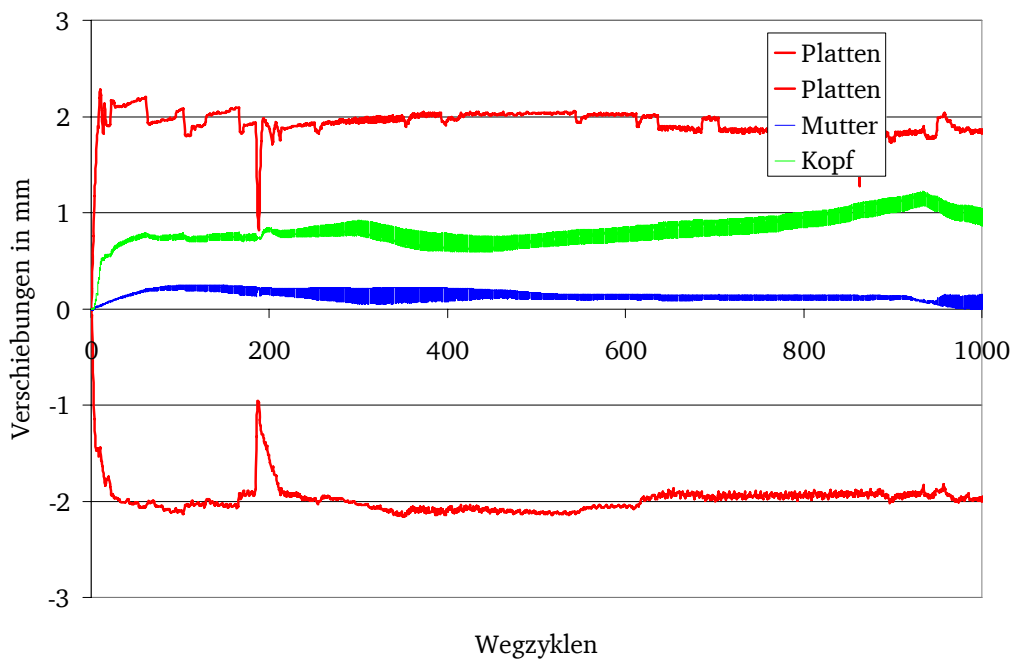
**Bild 29: Verschiebungen Versuch 10-2**



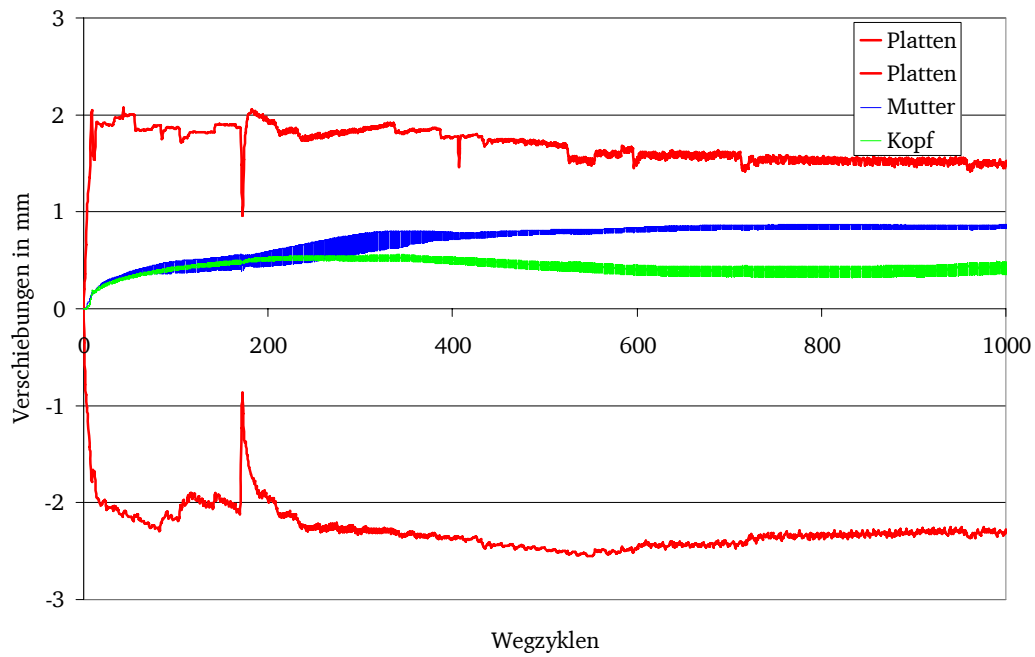
**Bild 30: Verschiebungen Versuch 11-2**



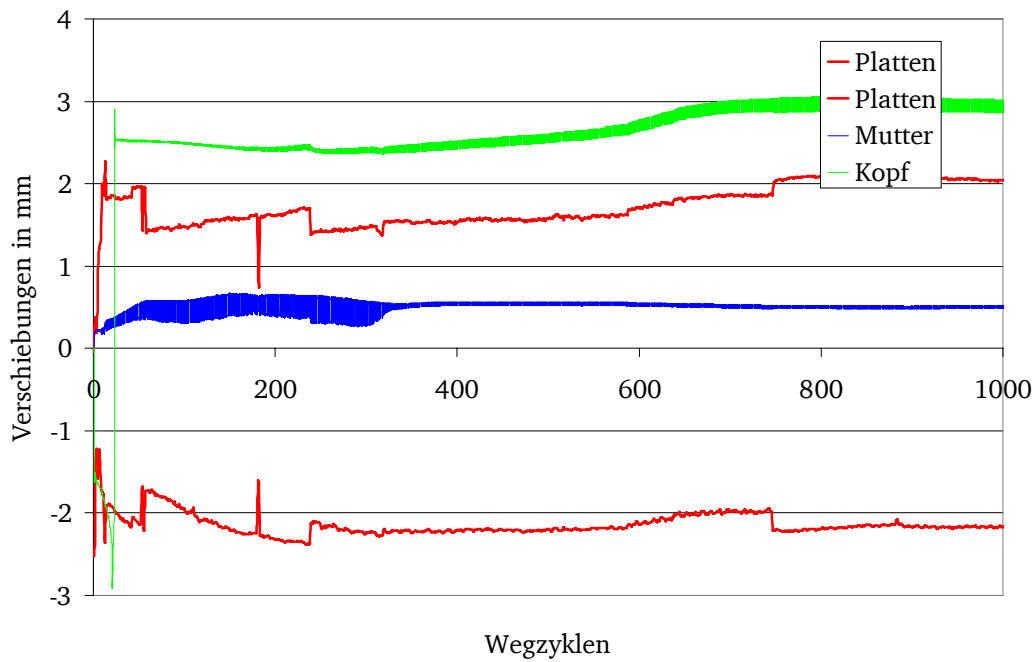
**Bild 31: Verschiebungen Versuch 11-3**



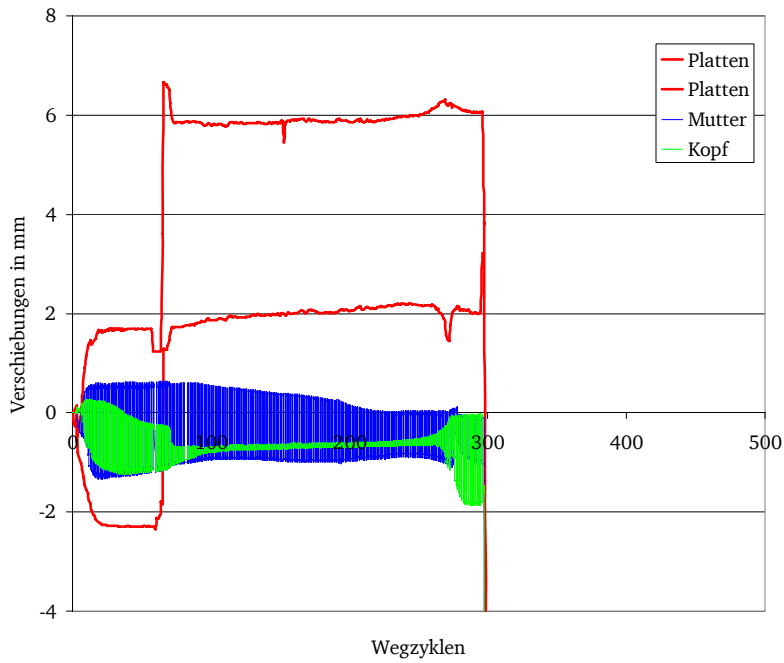
**Bild 32: Verschiebungen Versuch 12-1**



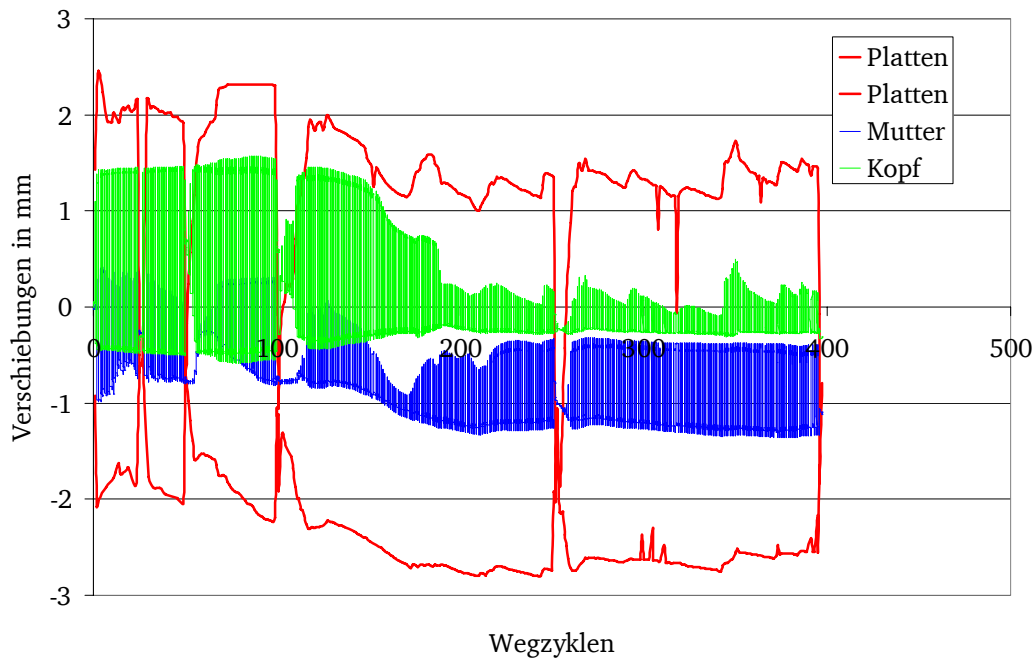
**Bild 33: Verschiebungen Versuch 12-2**



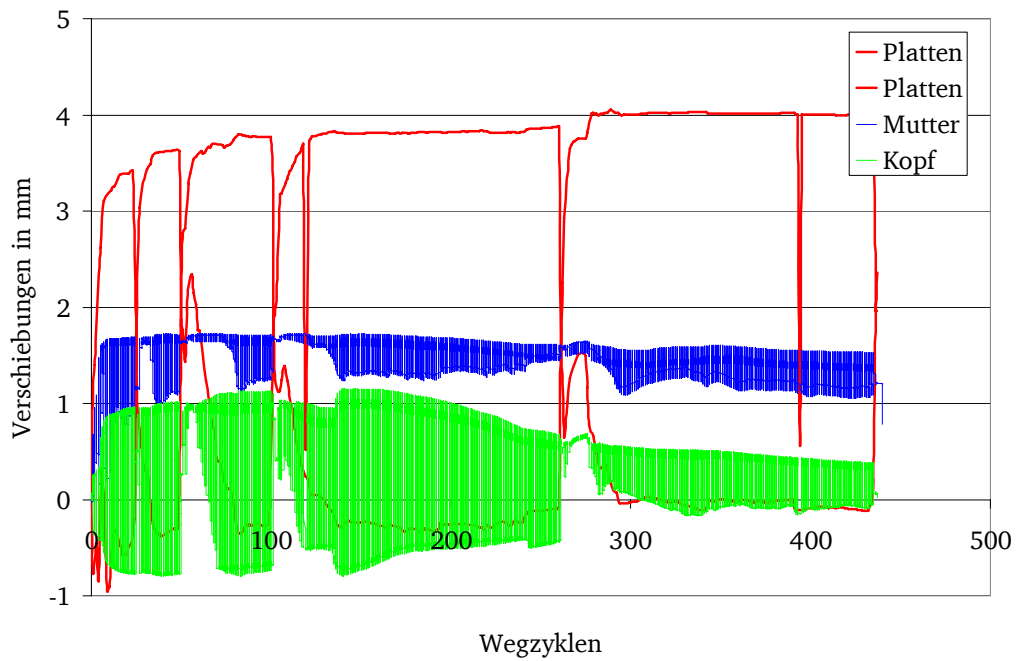
**Bild 34: Verschiebungen Versuch 12-3**



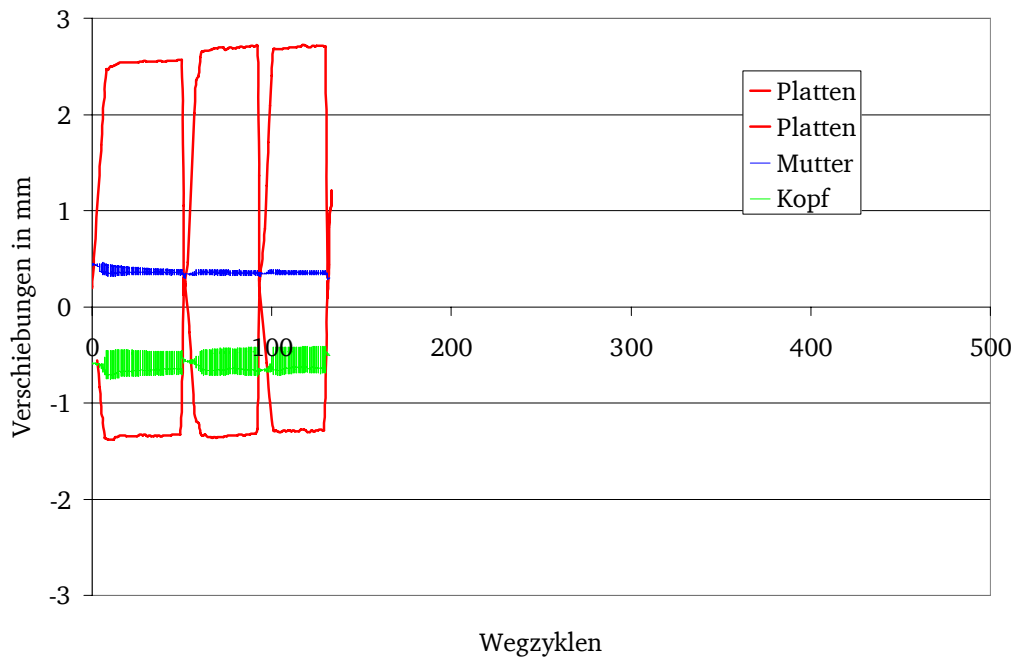
**Bild 35: Verschiebungen Versuch 13-1**



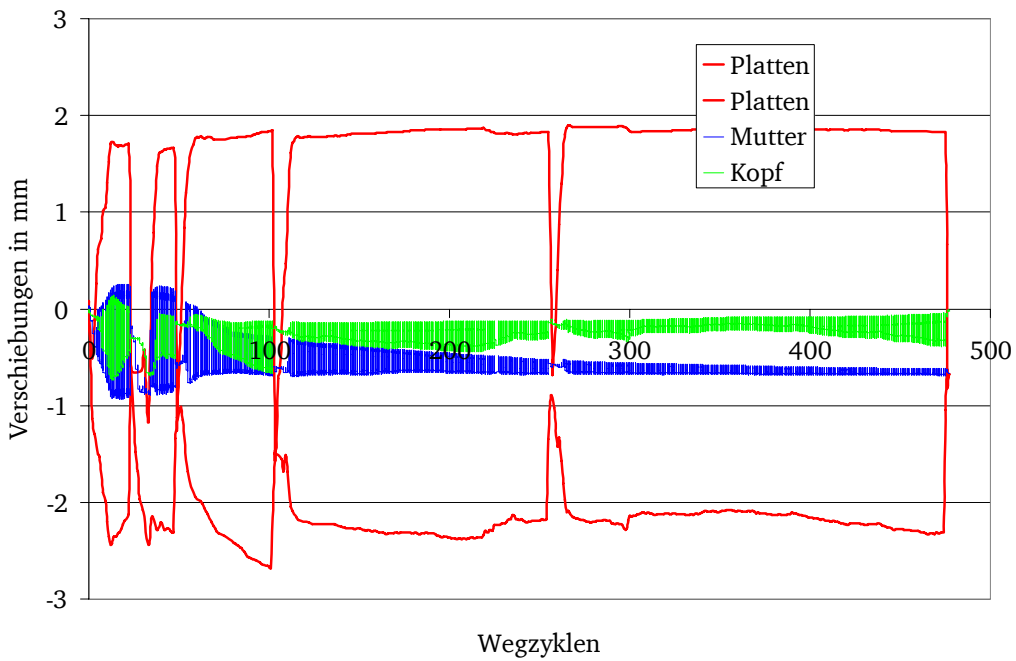
**Bild 36: Verschiebungen Versuch 13-2**



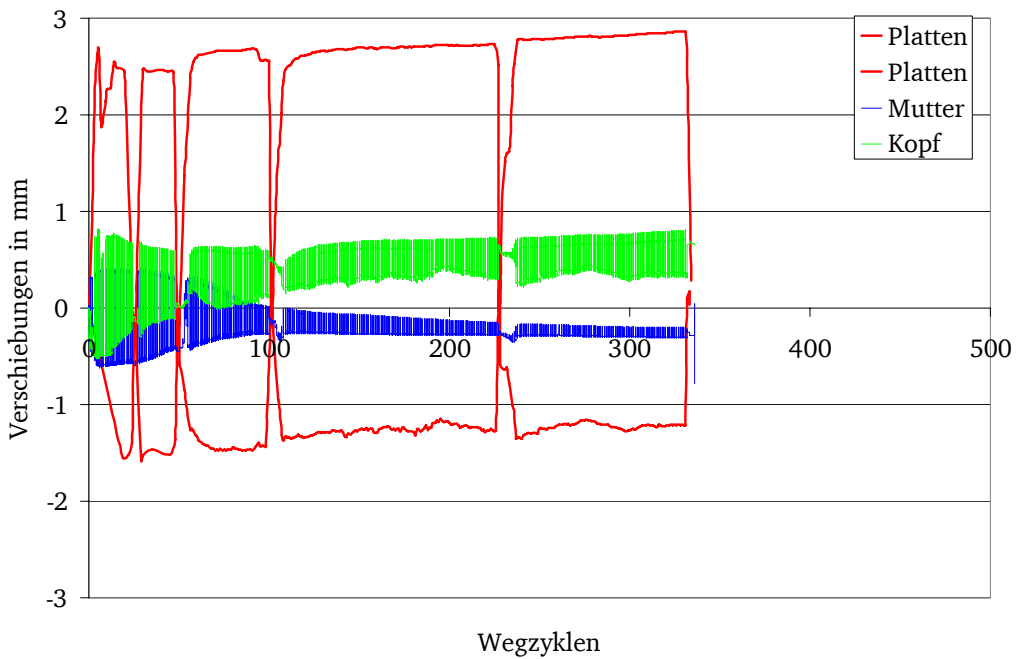
**Bild 37: Verschiebungen Versuch 13-3**



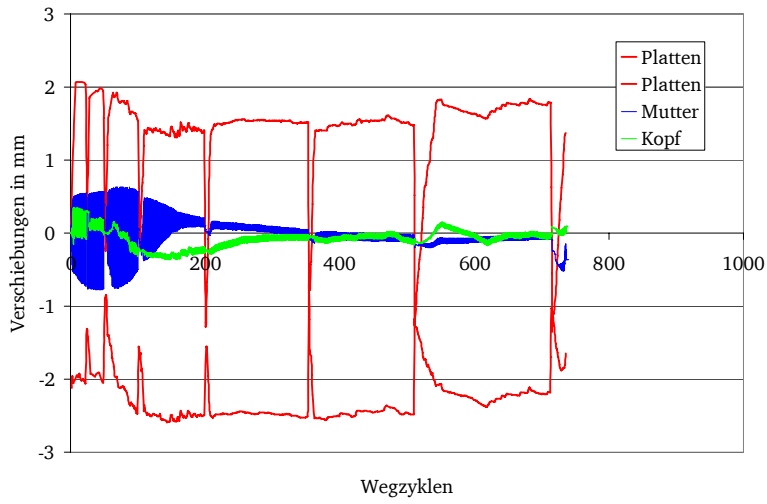
**Bild 38: Verschiebungen Versuch 14-1**



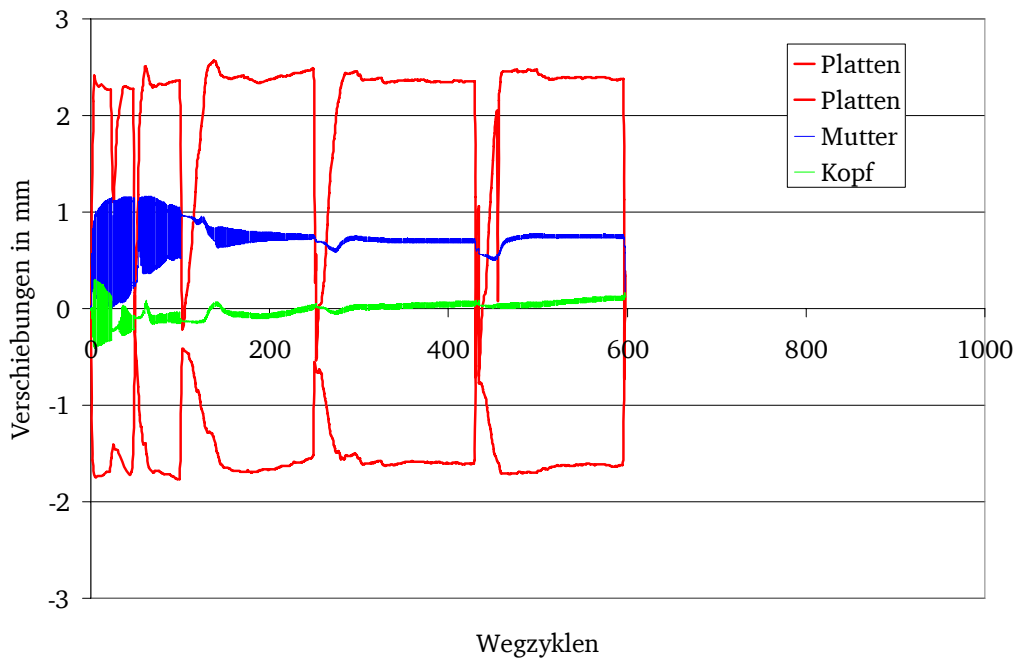
**Bild 39: Verschiebungen Versuch 14-2**



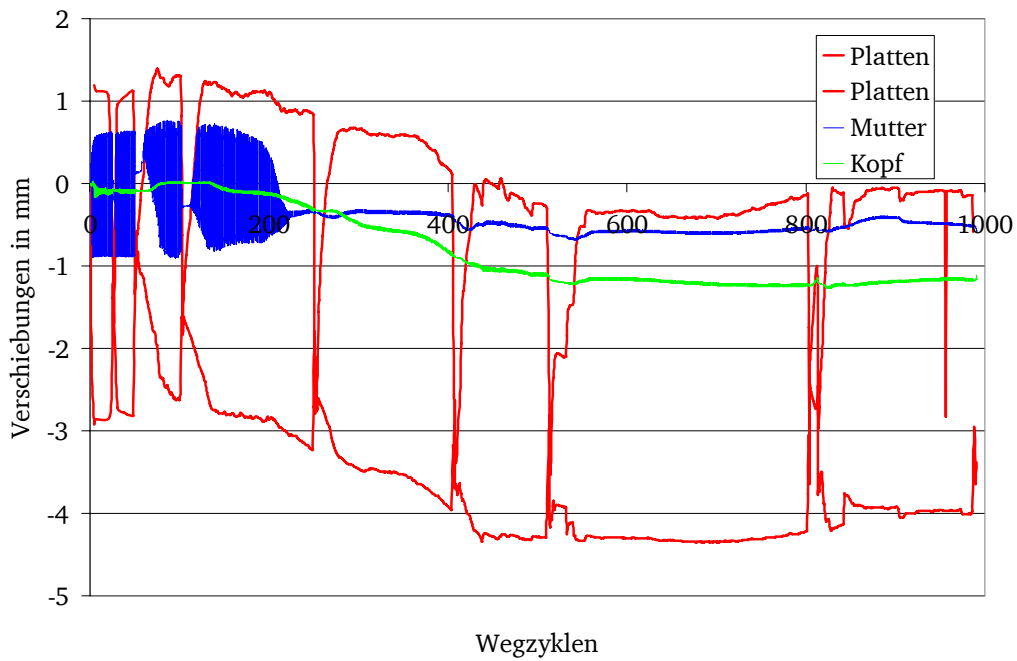
**Bild 40: Verschiebungen Versuch 14-3**



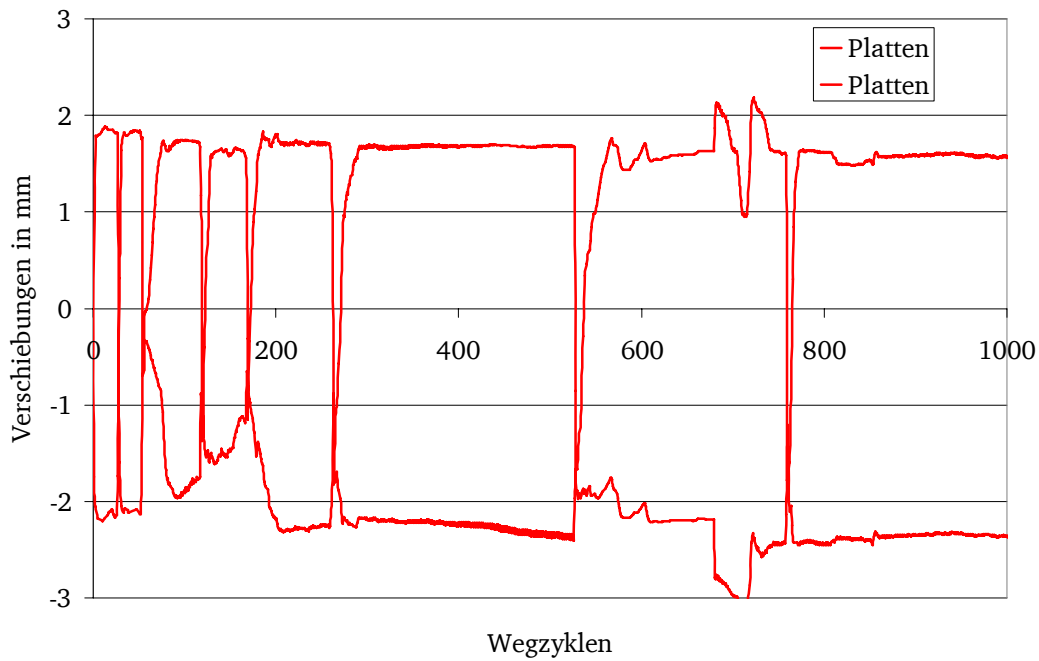
**Bild 41: Verschiebungen Versuch 15-1**



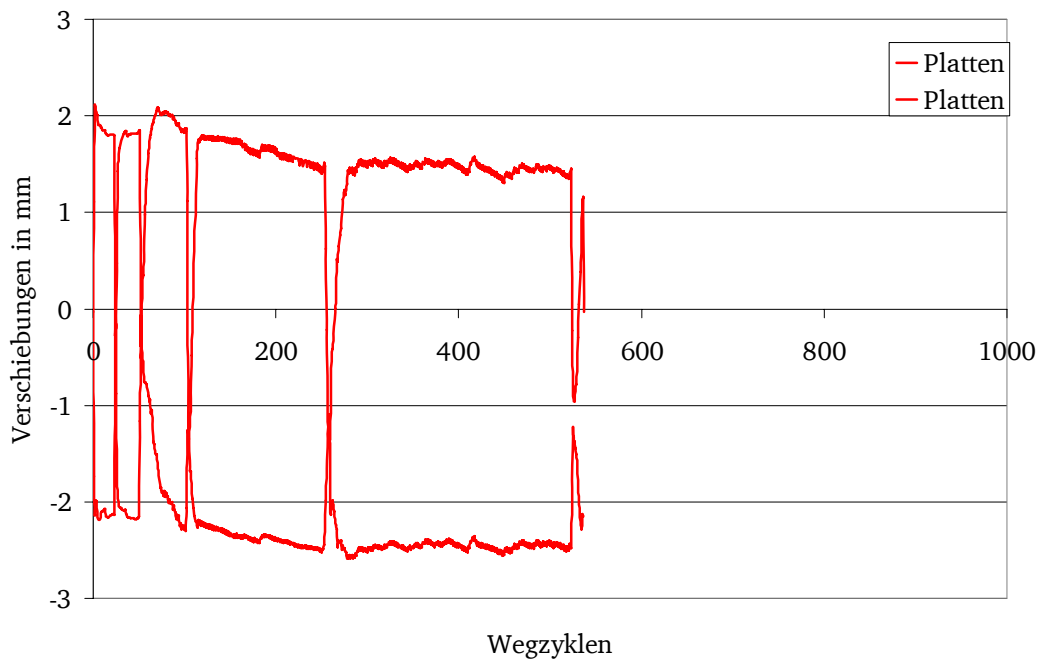
**Bild 42: Verschiebungen Versuch 15-2**



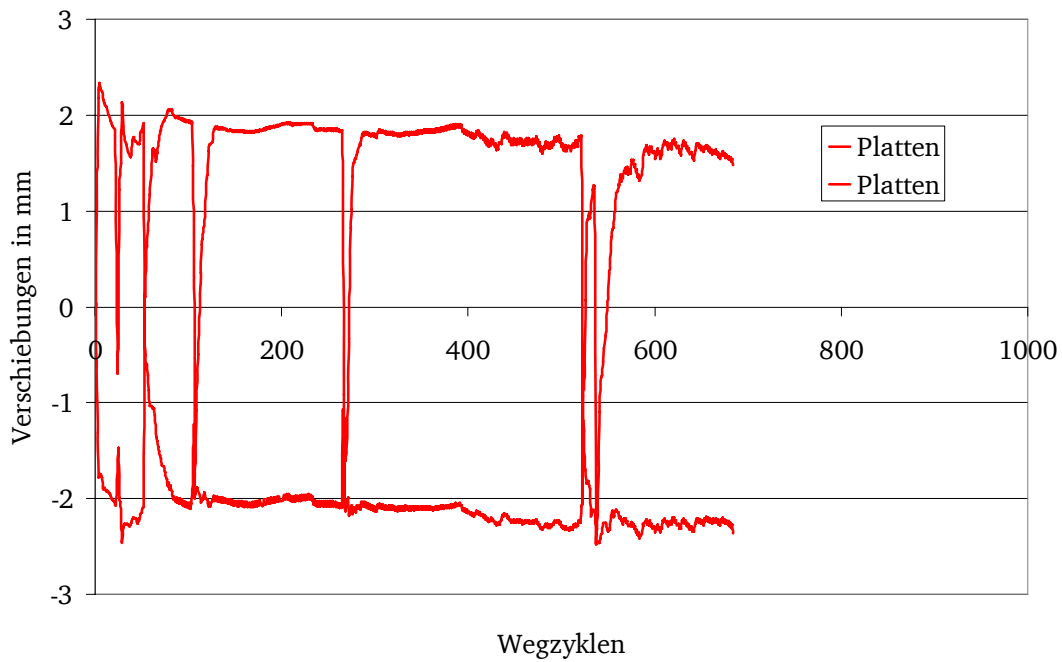
**Bild 43: Verschiebungen Versuch 15-3**



**Bild 44: Verschiebungen Versuch 16-1**



**Bild 45: Verschiebungen Versuch 16-2**



**Bild 46: Verschiebungen Versuch 16-3**

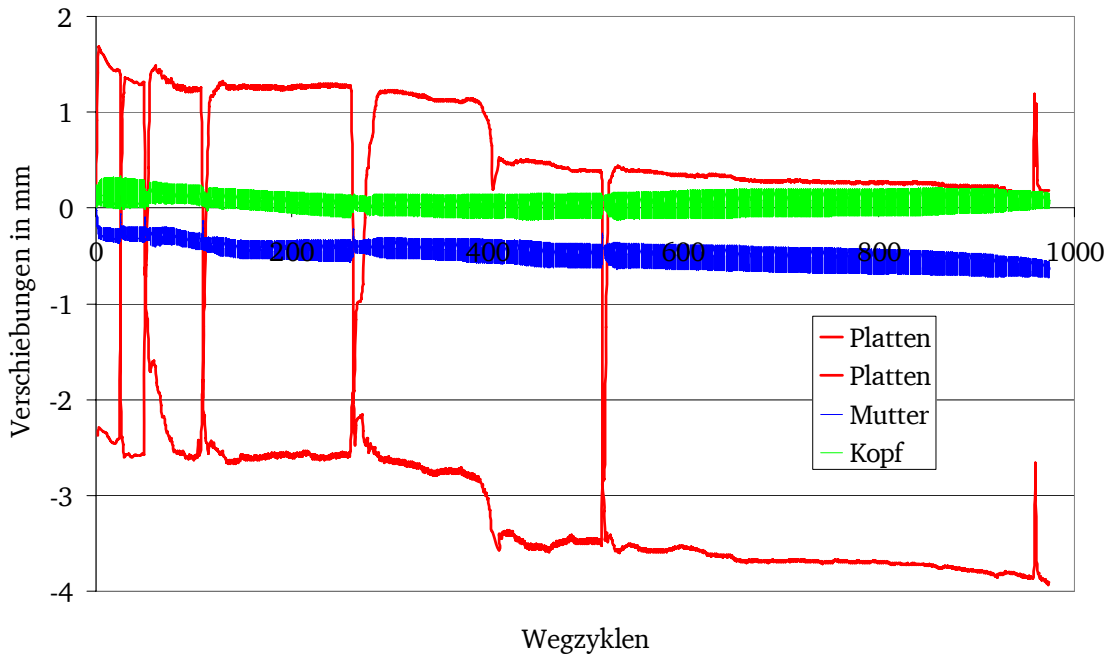


Bild 47: Verschiebungen Versuch 17-1

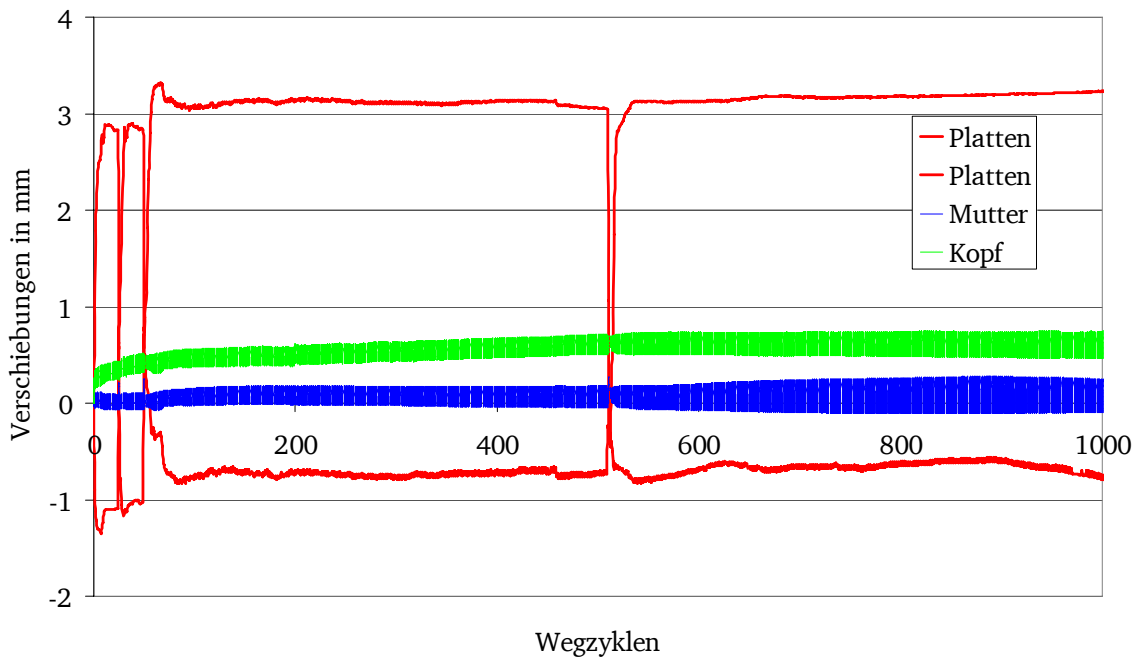


Bild 48: Verschiebungen Versuch 17-2

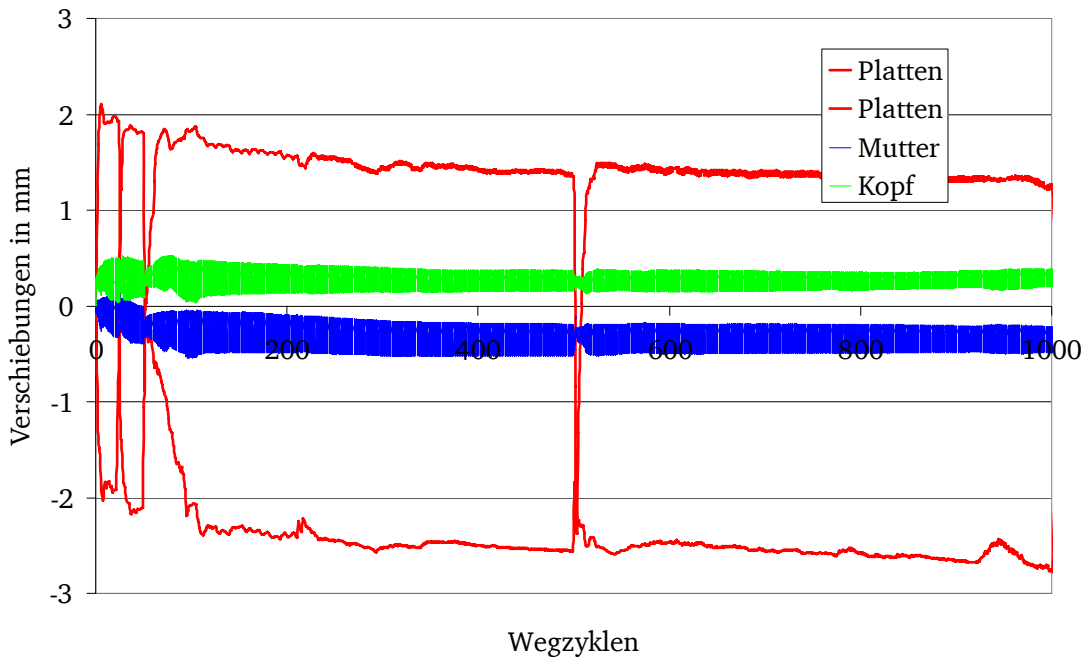


Bild 49: Verschiebungen Versuch 17-3

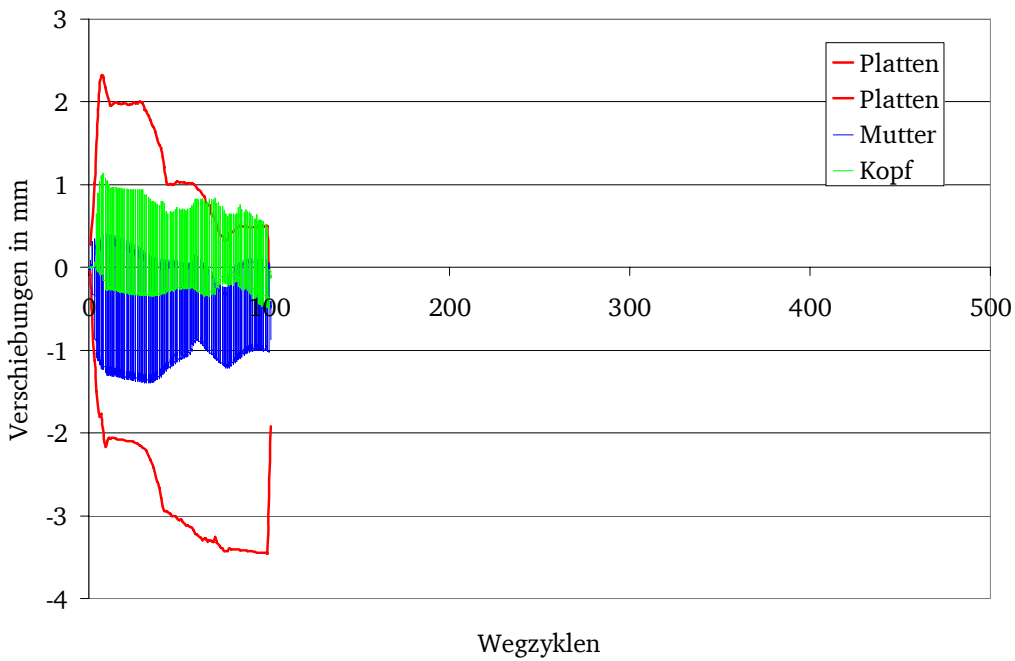


Bild 50: Verschiebungen Versuch 20-1

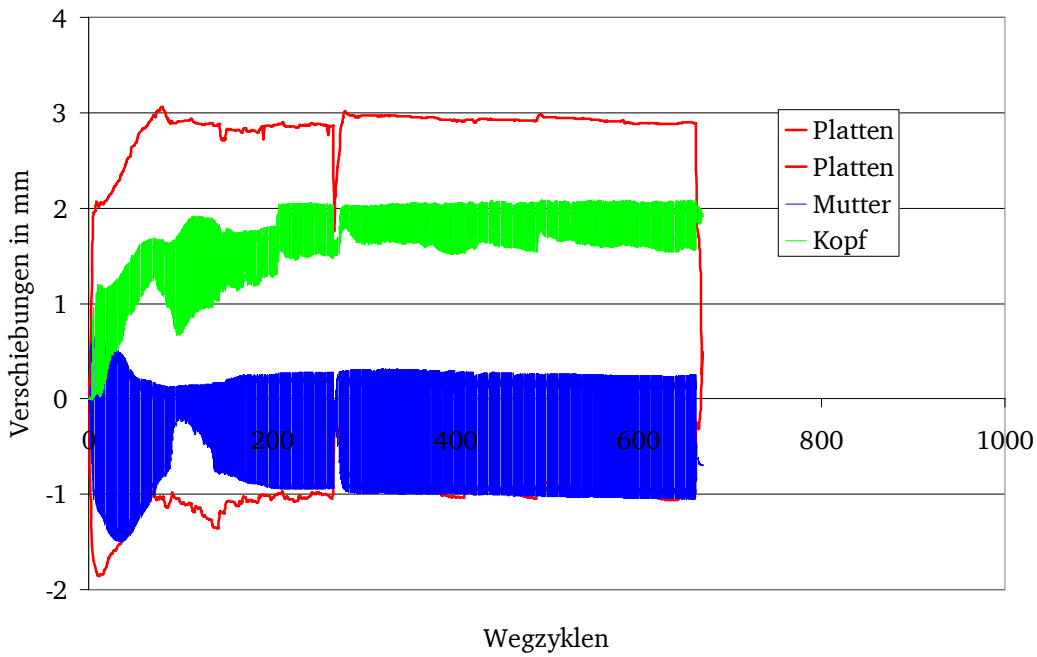


Bild 51: Verschiebungen Versuch 20-2

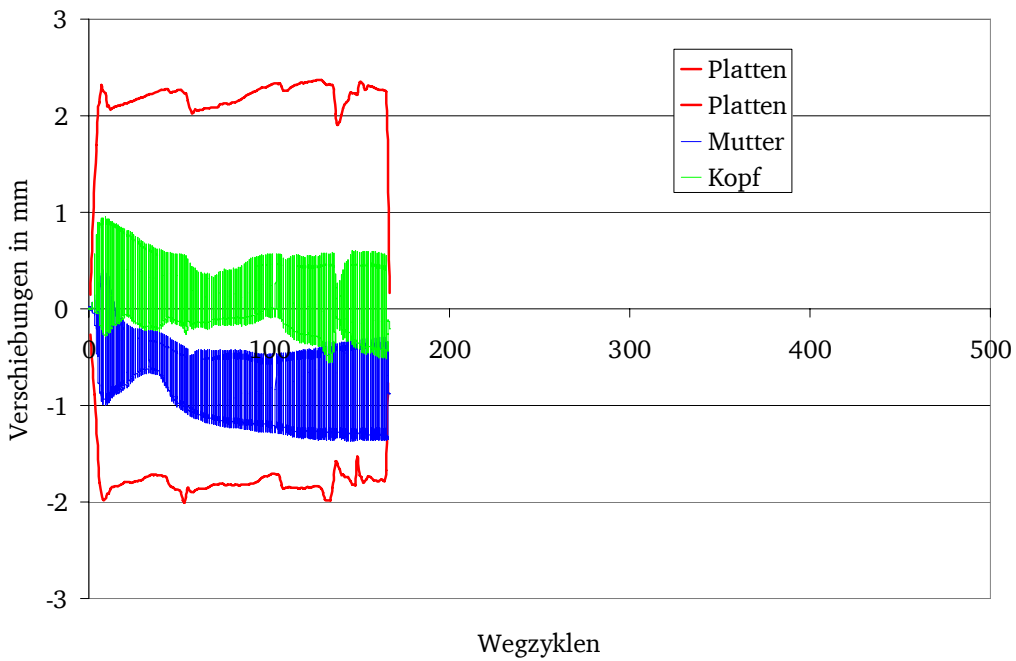


Bild 52: Verschiebungen Versuch 20-3

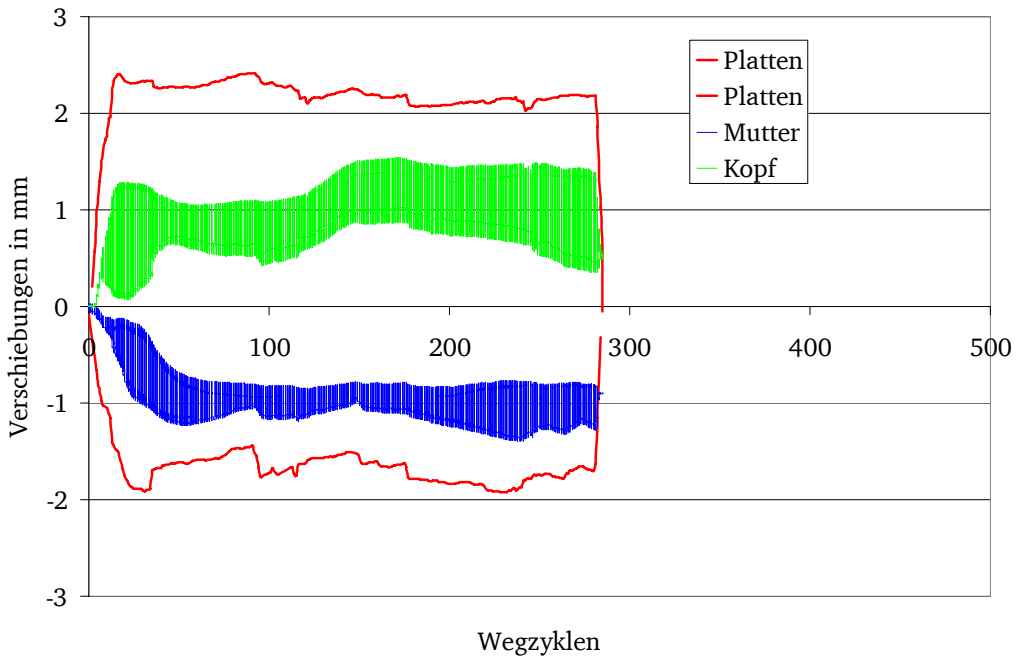


Bild 53: Verschiebungen Versuch 21-1

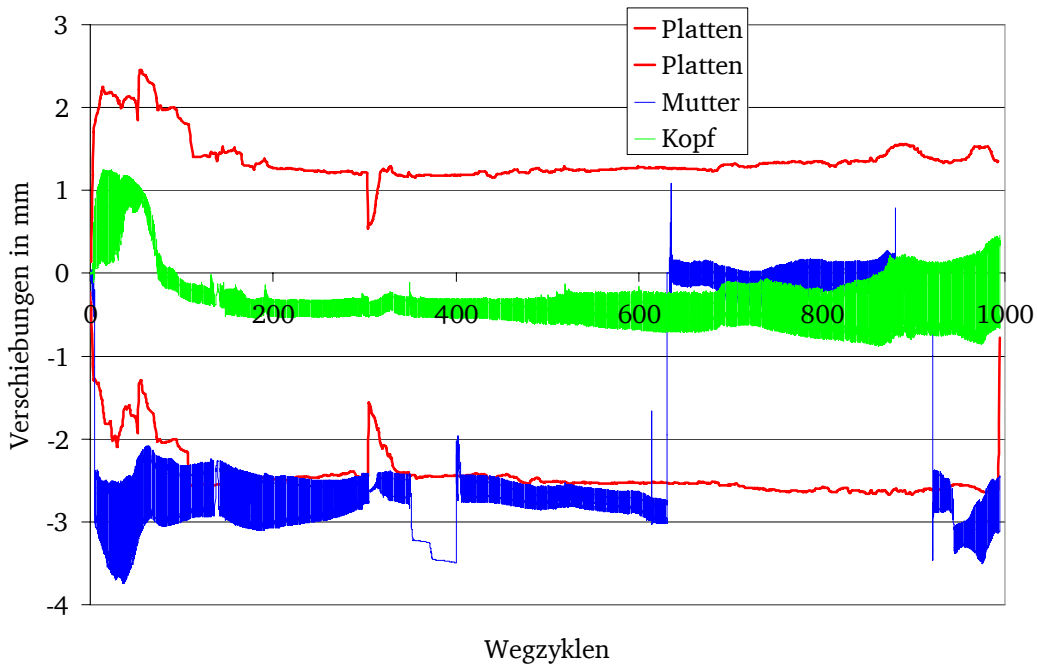


Bild 54: Verschiebungen Versuch 21-2

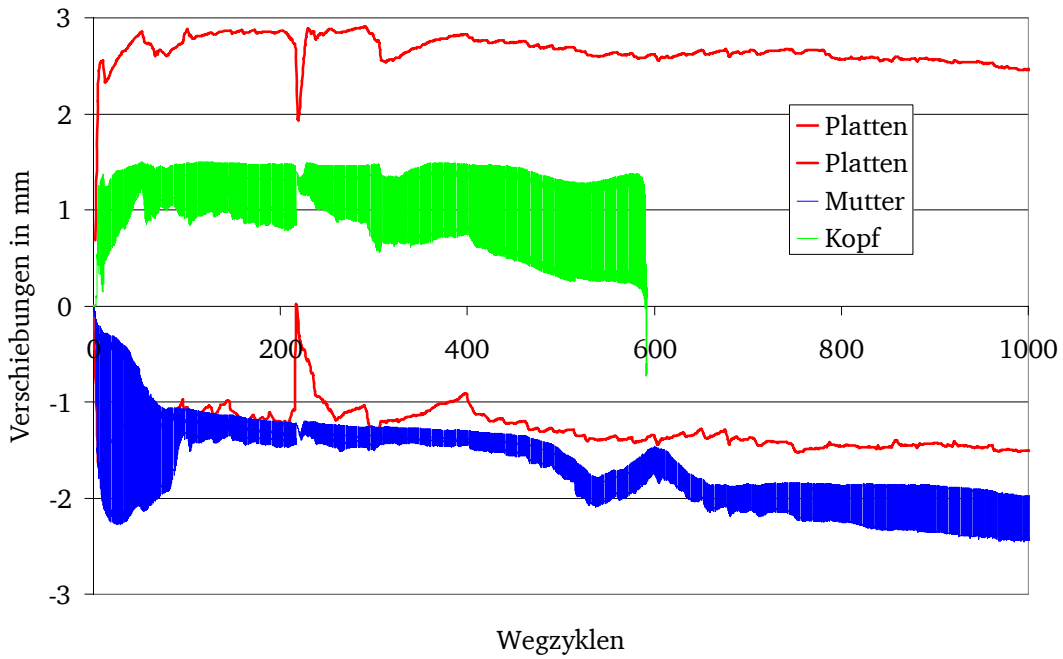


Bild 55: Verschiebungen Versuch 21-3

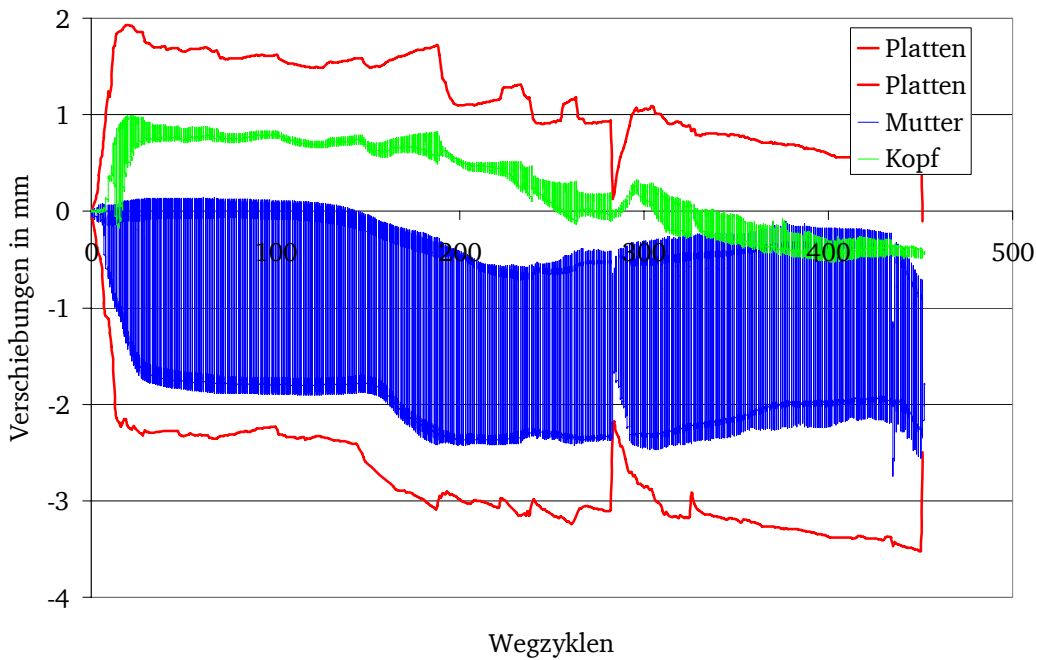


Bild 56: Verschiebungen Versuch 22-1

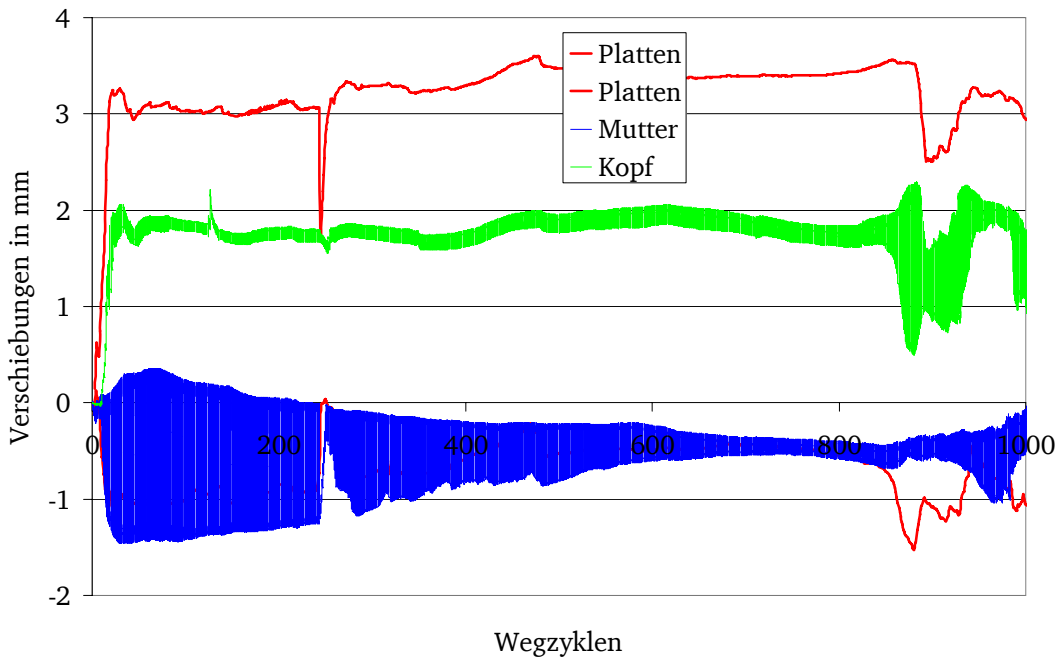


Bild 57: Verschiebungen Versuch 22-2

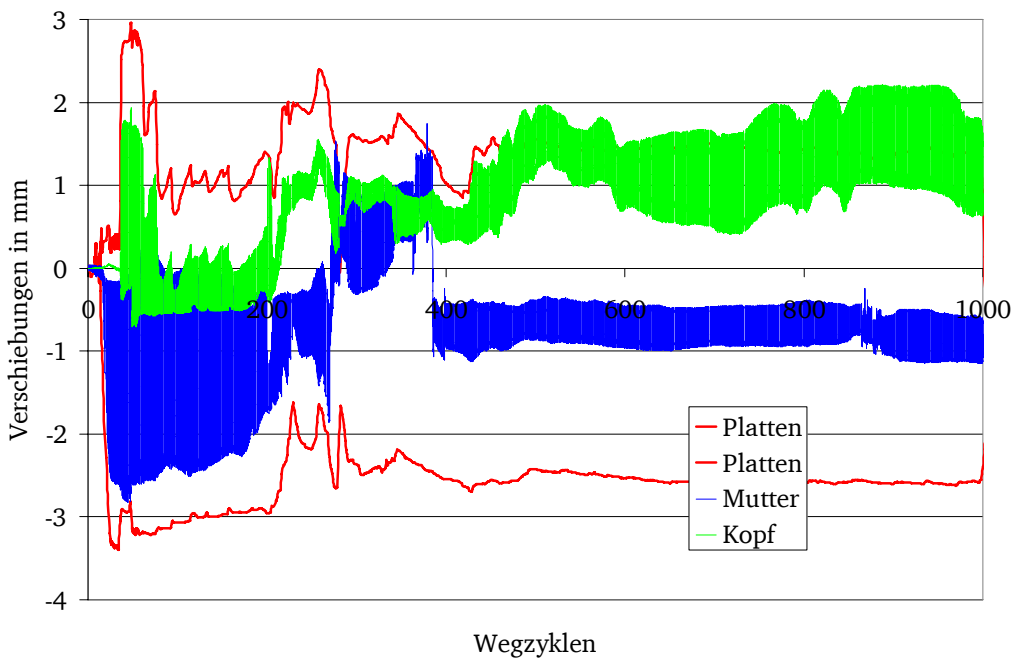


Bild 58: Verschiebungen Versuch 22-3

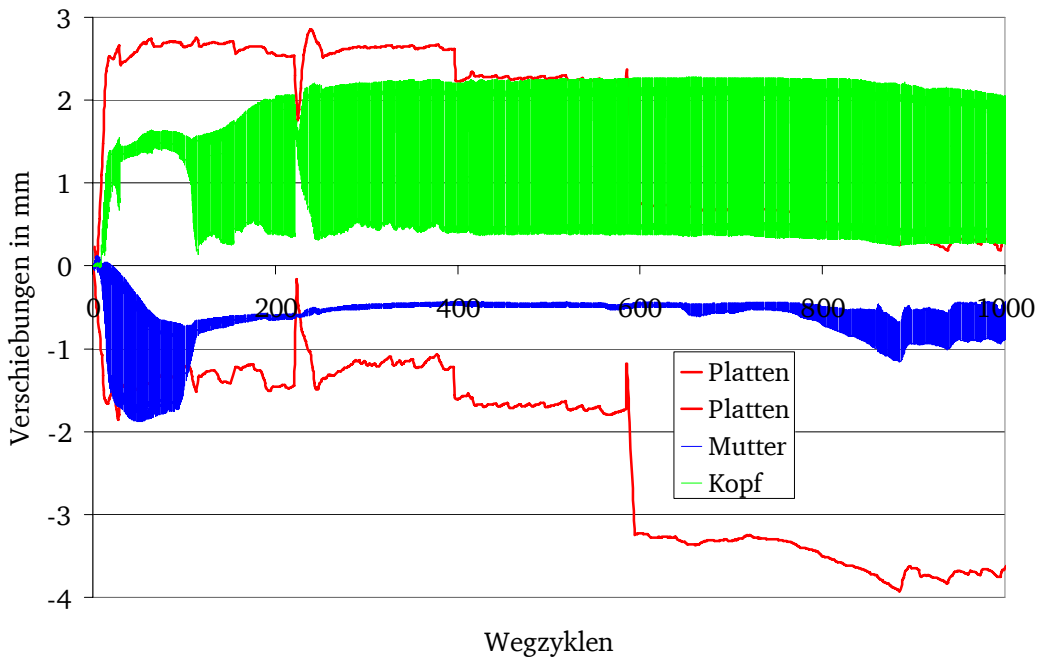


Bild 59: Verschiebungen Versuch 23-1

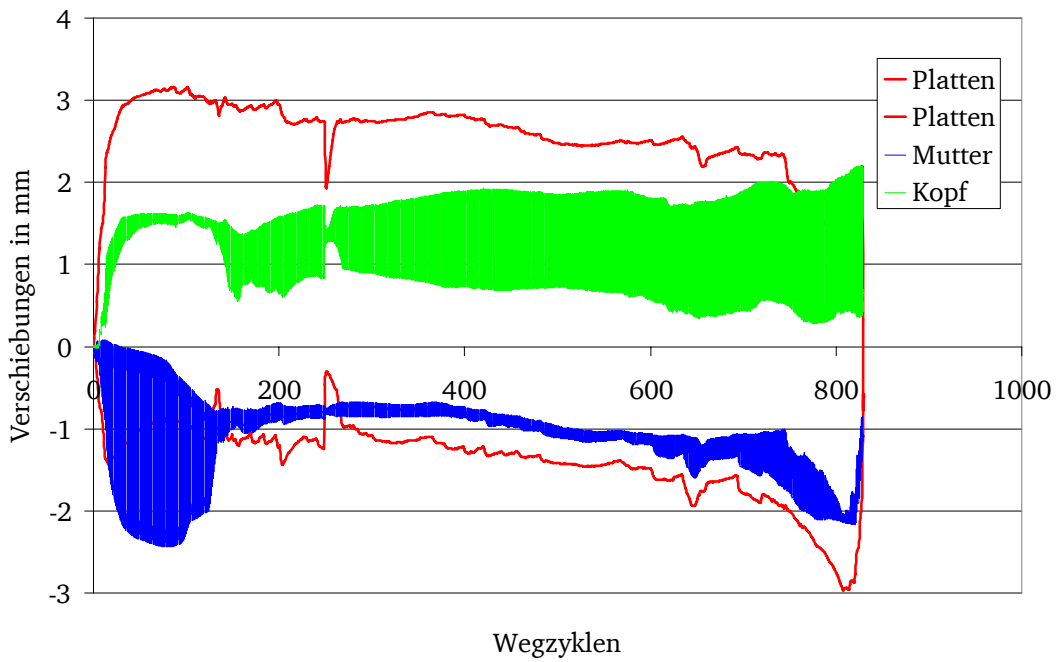


Bild 60: Verschiebungen Versuch 23-2

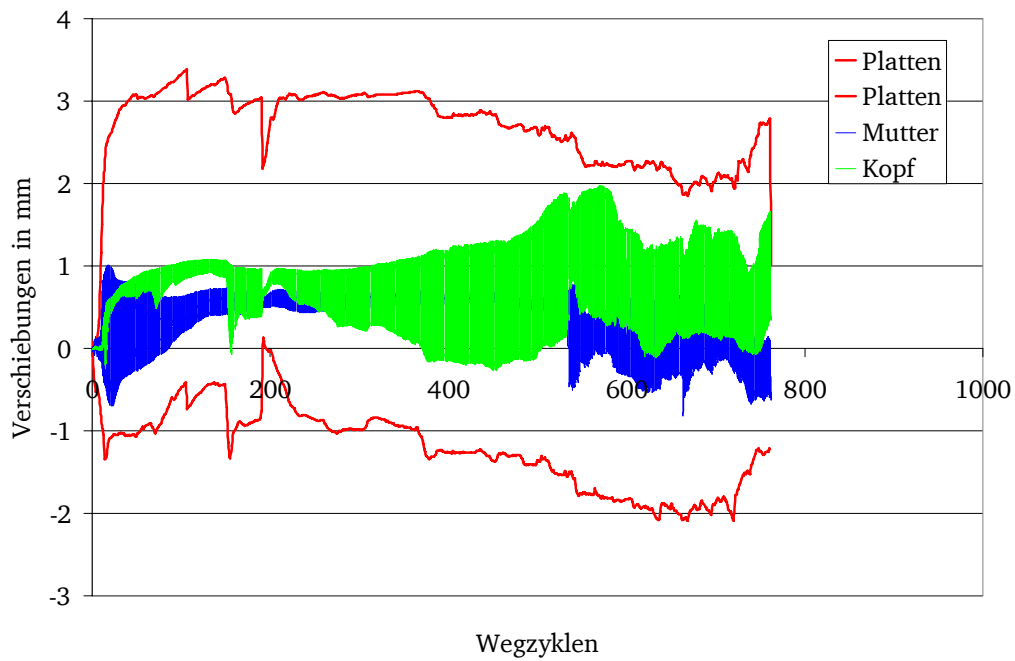


Bild 61: Verschiebungen Versuch 23-3

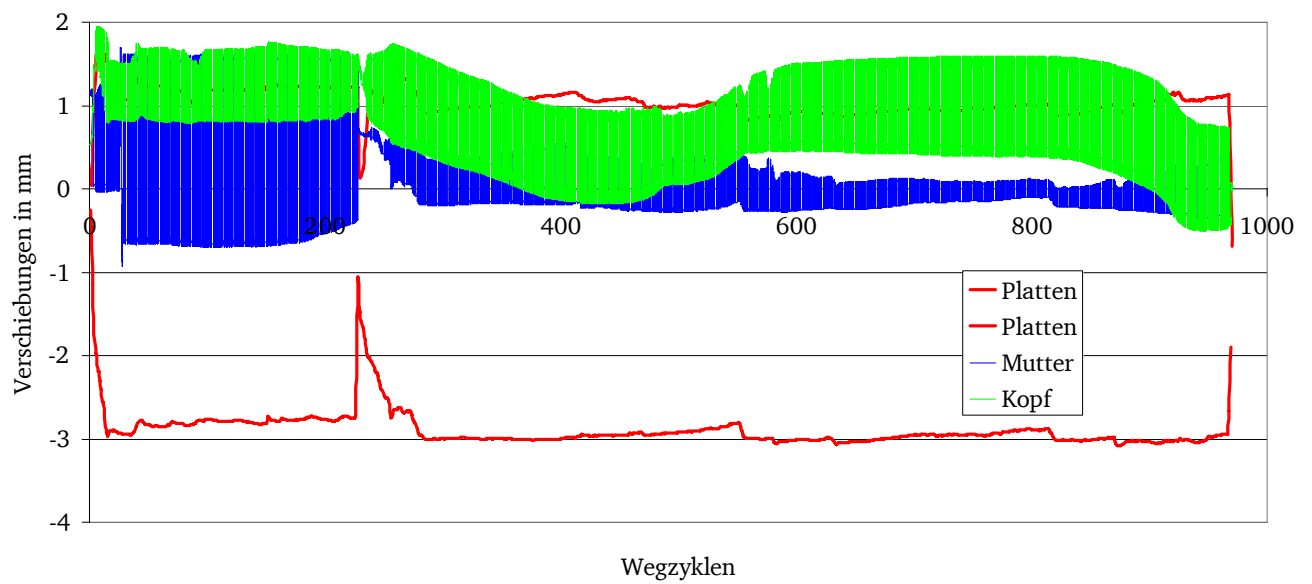


Bild 62: Verschiebungen Versuch 24-1

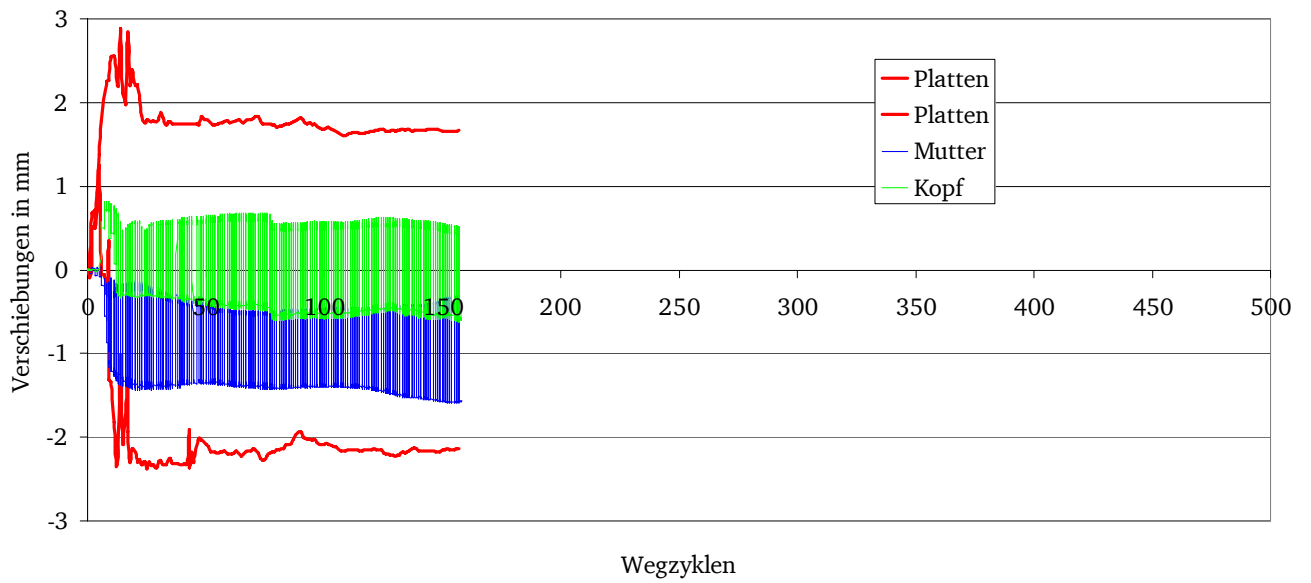


Bild 63: Verschiebungen Versuch 24-2

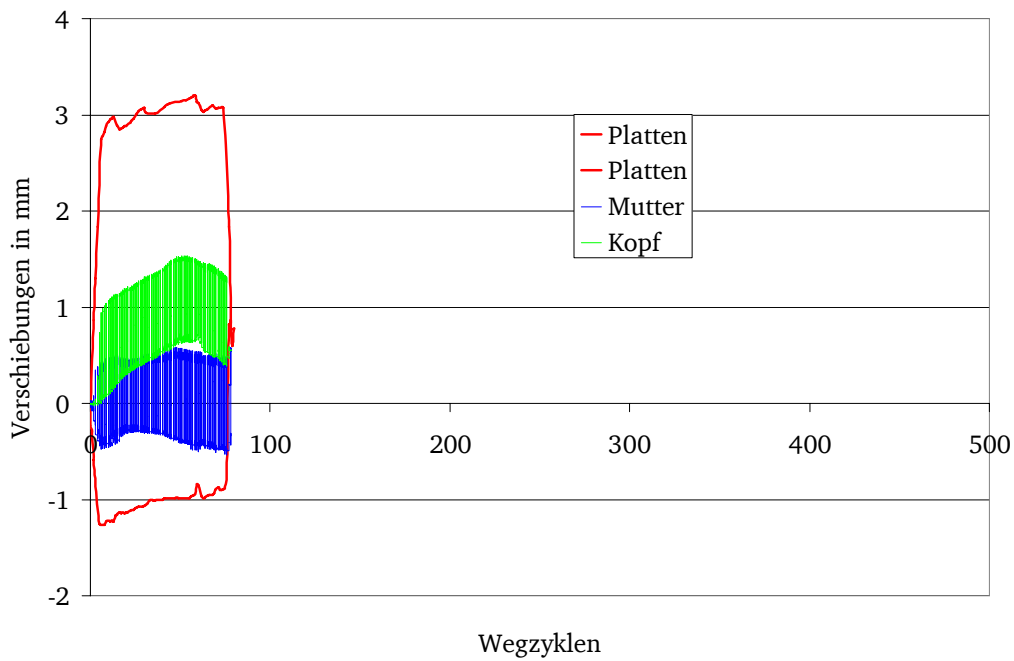


Bild 64: Verschiebungen Versuch 24-3

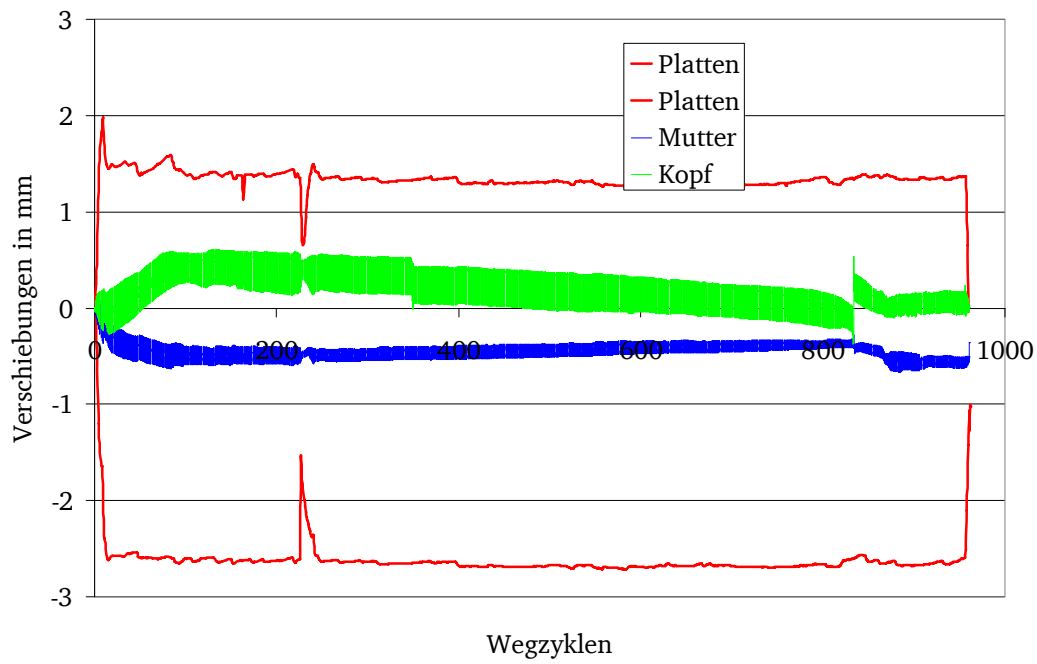


Bild 65: Verschiebungen Versuch 25-1

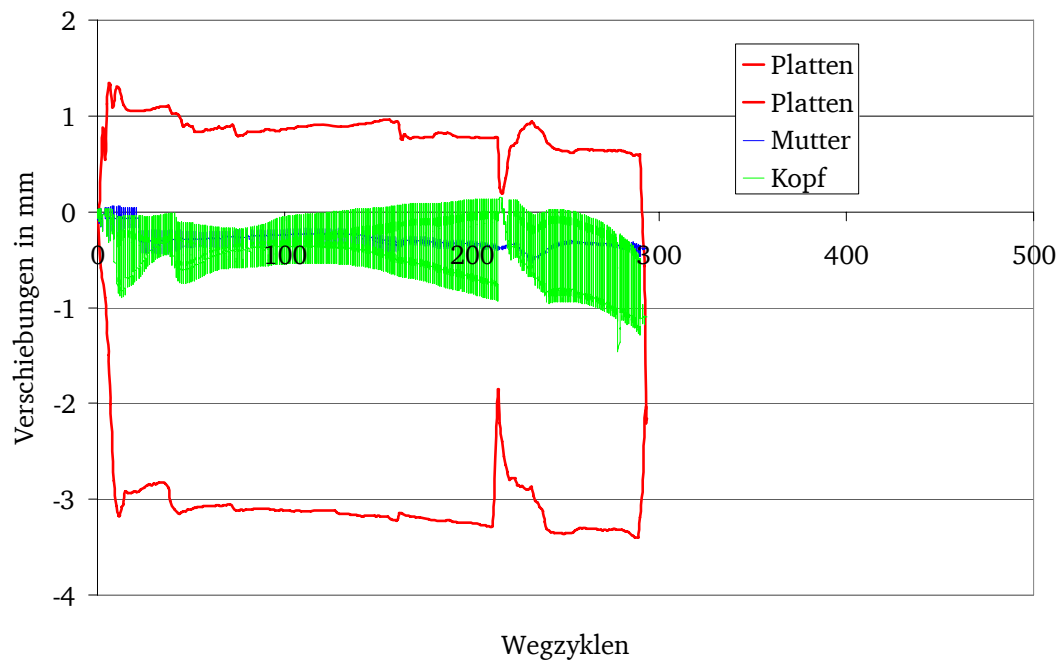


Bild 66: Verschiebungen Versuch 25-2

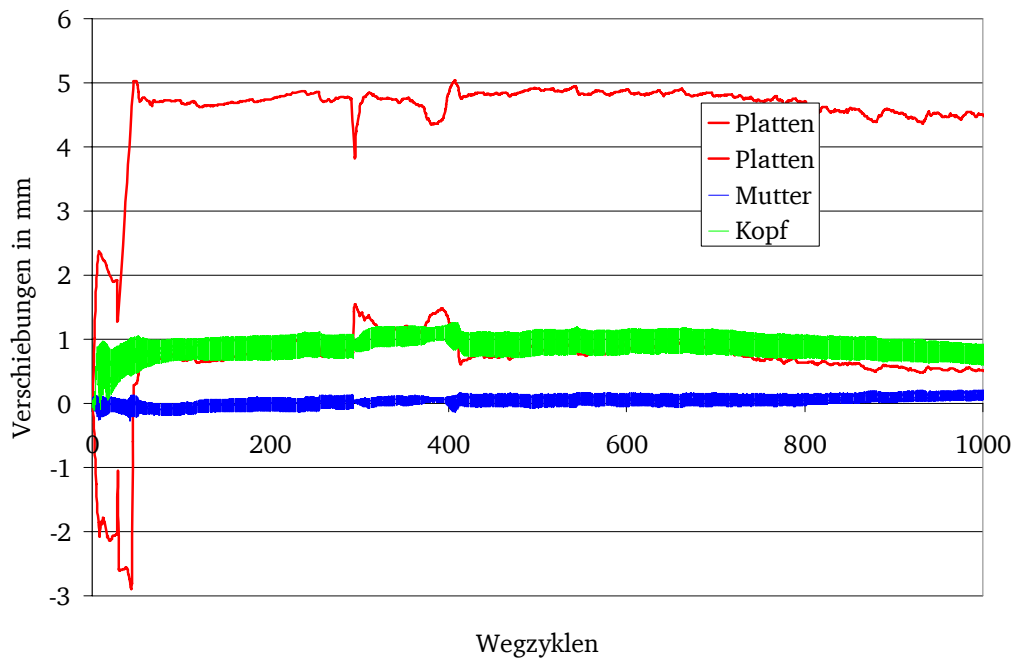


Bild 67: Verschiebungen Versuch 25-3

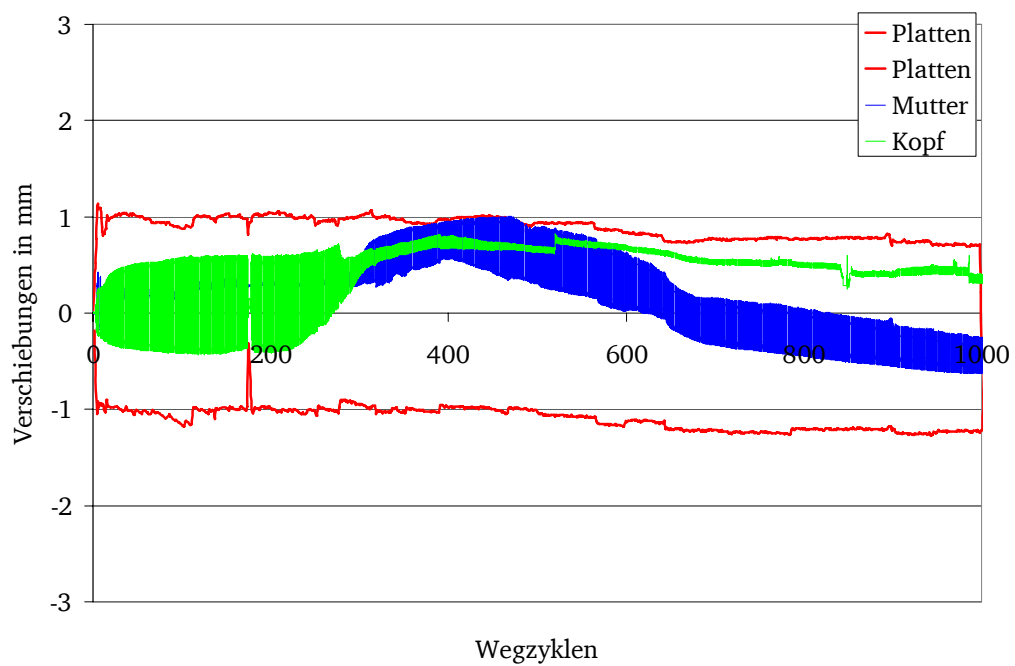


Bild 68: Verschiebungen Versuch 26-1

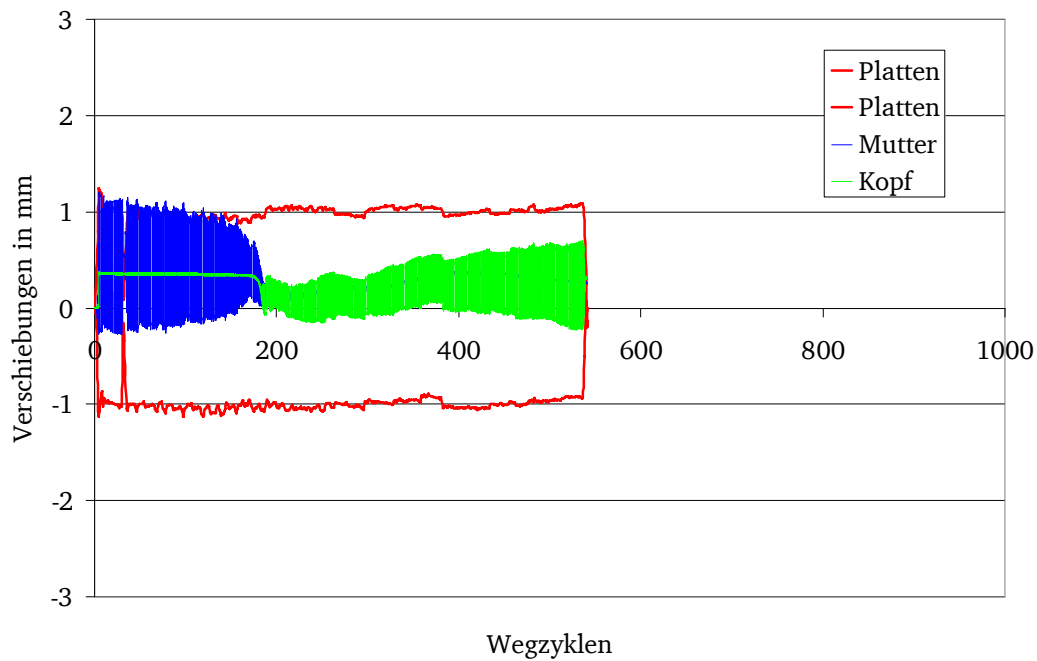


Bild 69: Verschiebungen Versuch 26-2

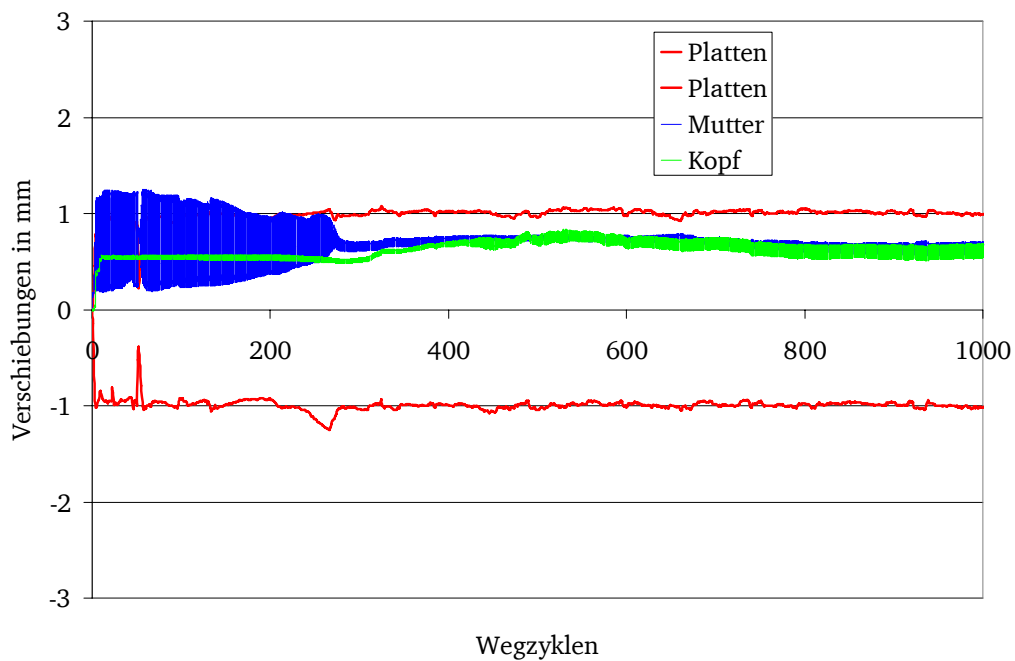


Bild 70: Verschiebungen Versuch 26-3

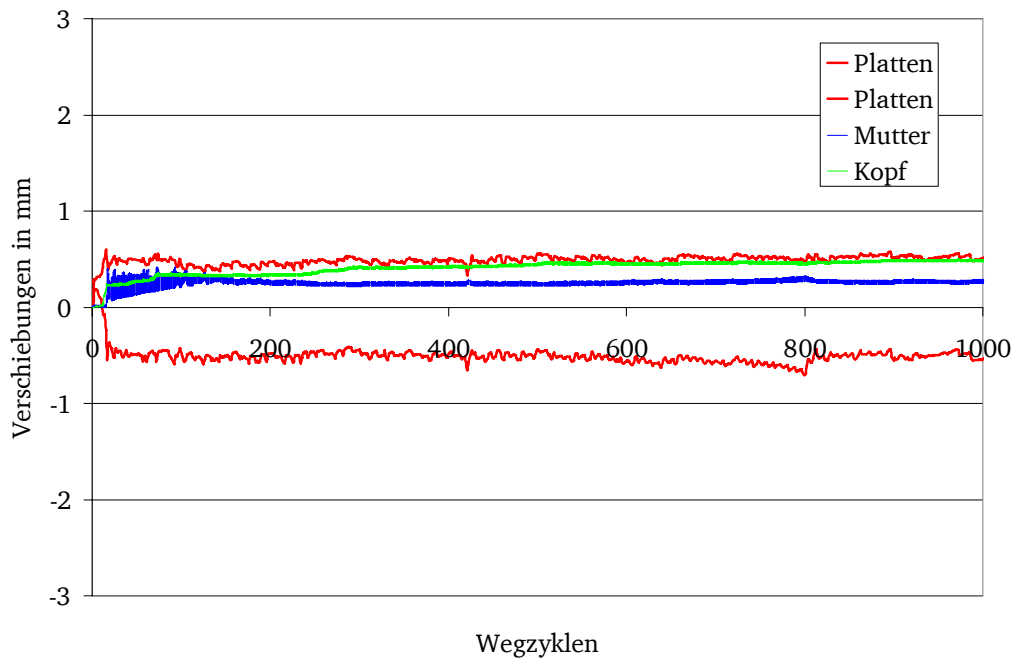


Bild 71: Verschiebungen Versuch 27-1

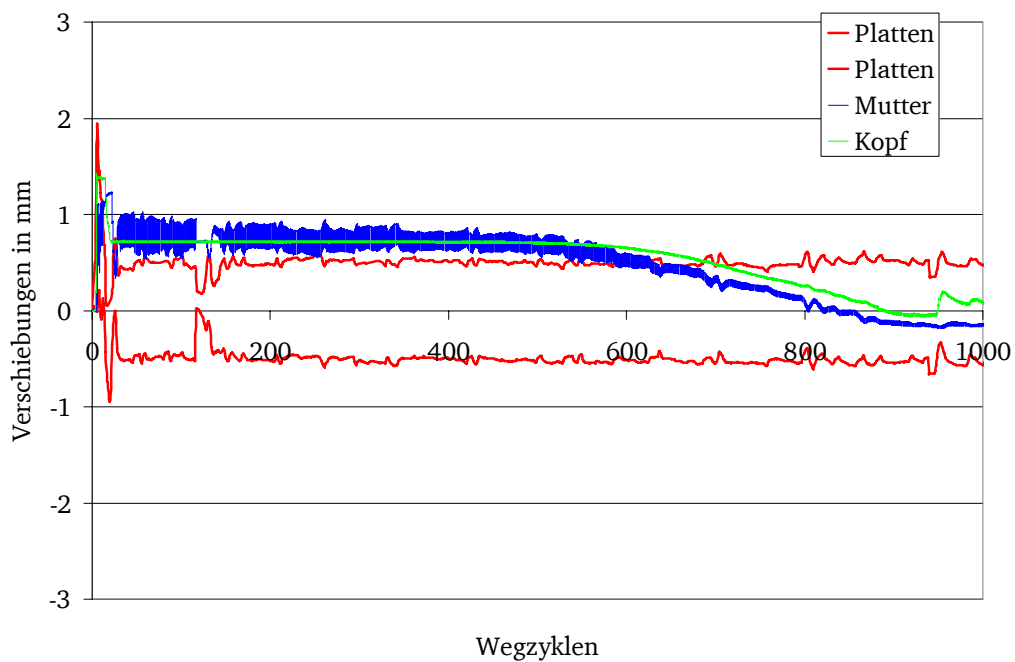


Bild 72: Verschiebungen Versuch 27-2

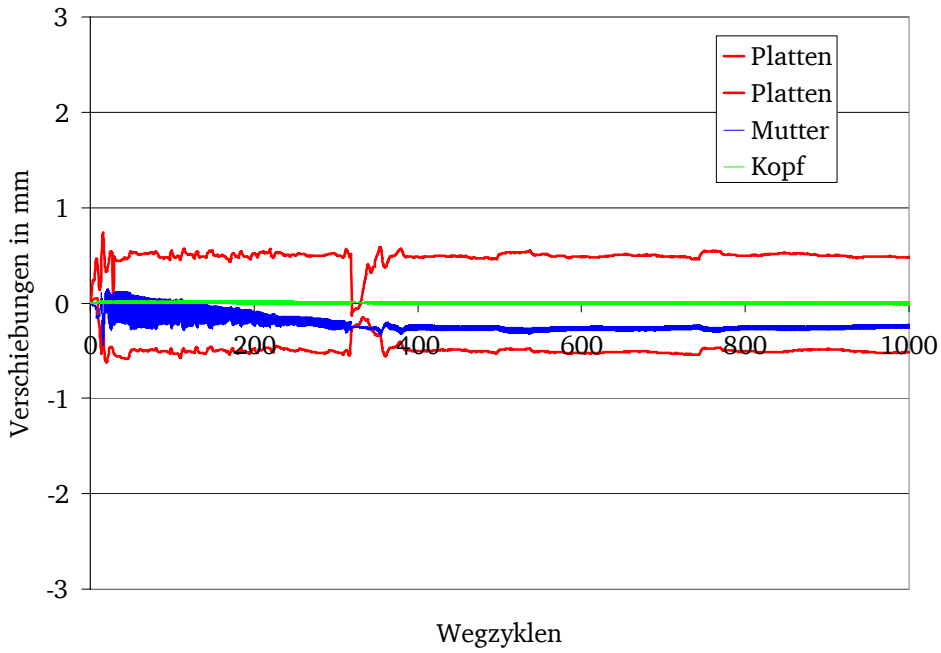


Bild 73: Verschiebungen Versuch 27-3

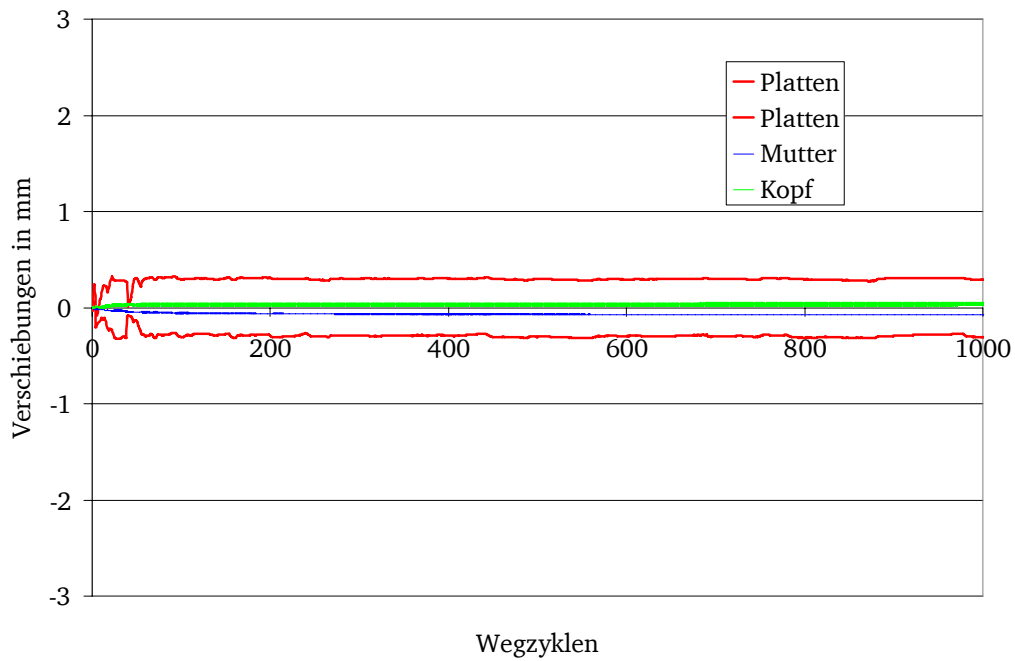


Bild 74: Verschiebungen Versuch 28-1

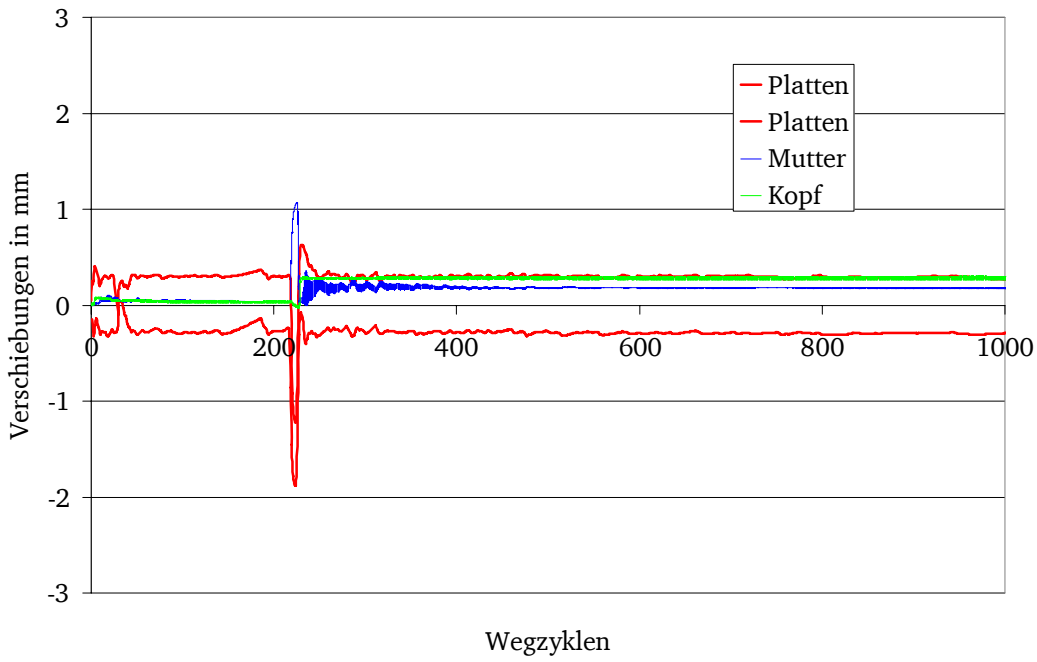


Bild 75: Verschiebungen Versuch 28-2

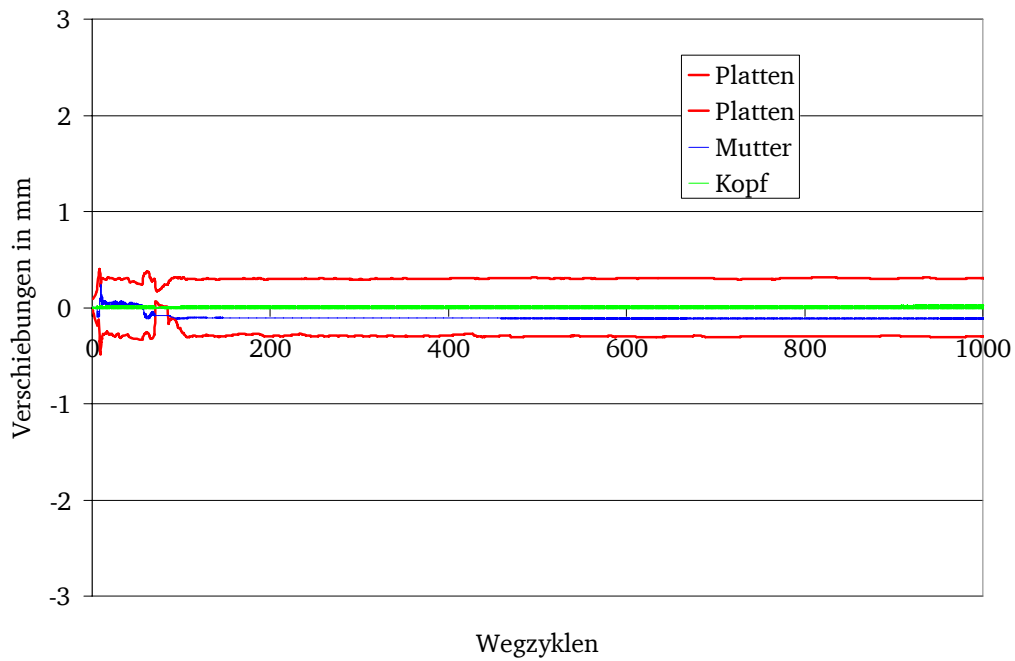


Bild 76: Verschiebungen Versuch 28-3

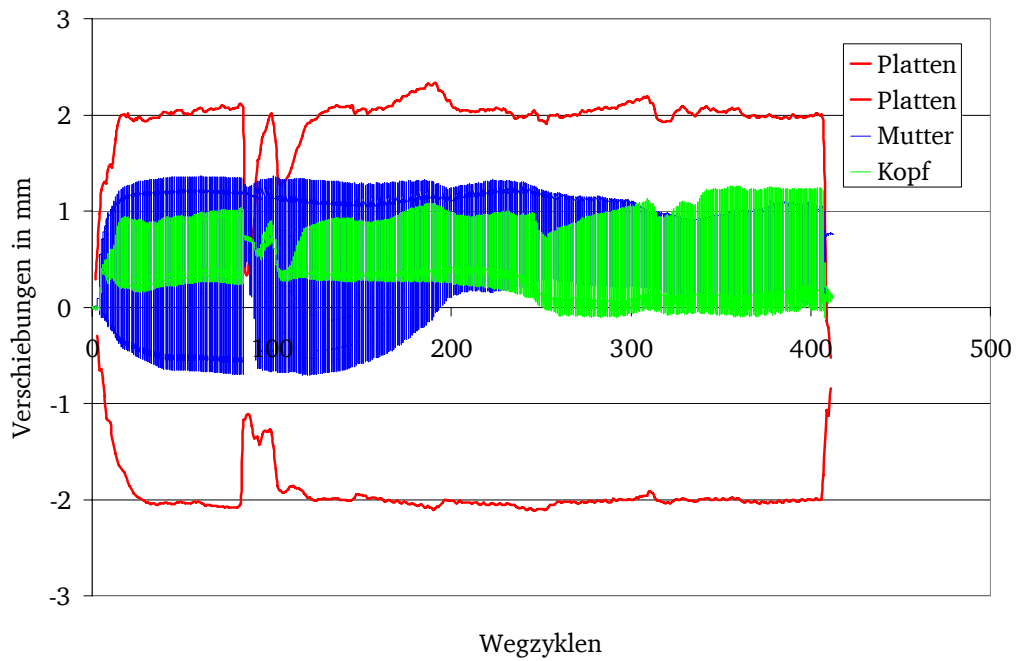


Bild 77: Verschiebungen Versuch 29-1

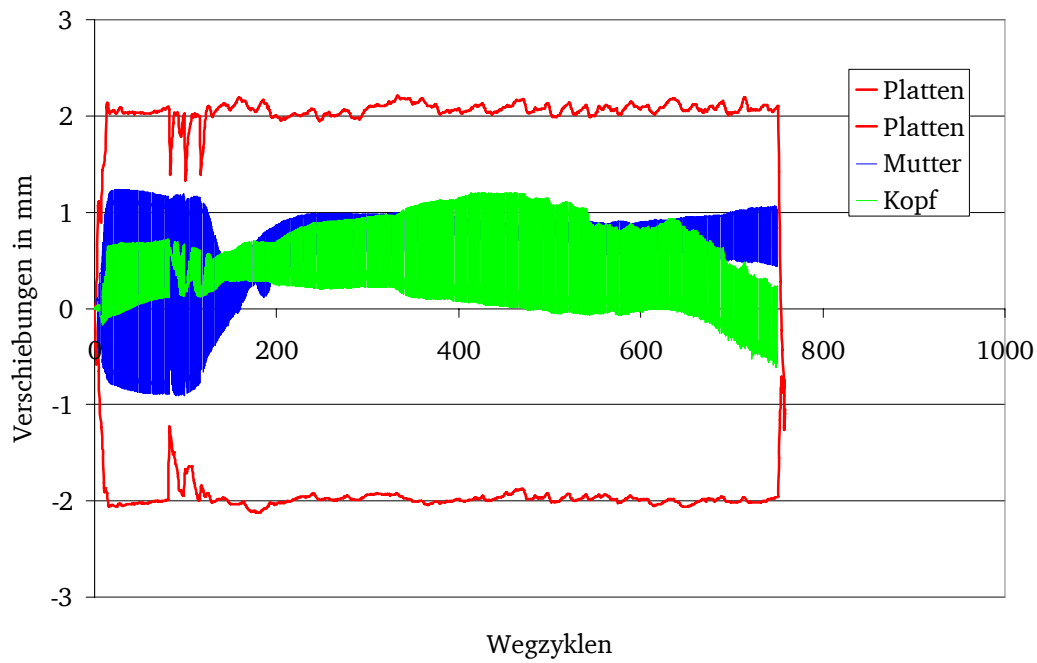


Bild 78: Verschiebungen Versuch 29-2

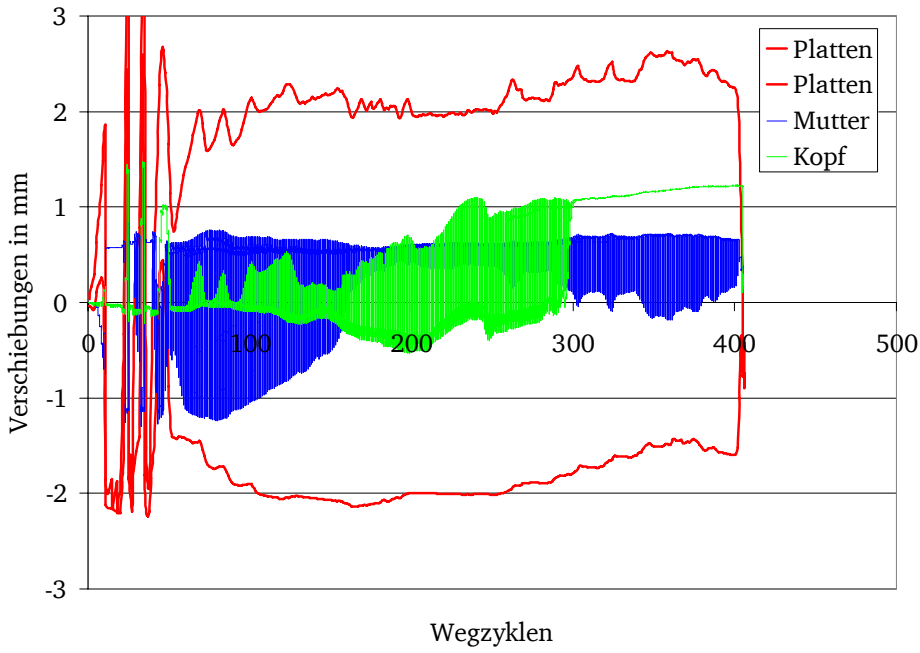


Bild 79: Verschiebungen Versuch 29-3



Bild 80: Verschiebungen Versuch 30-1

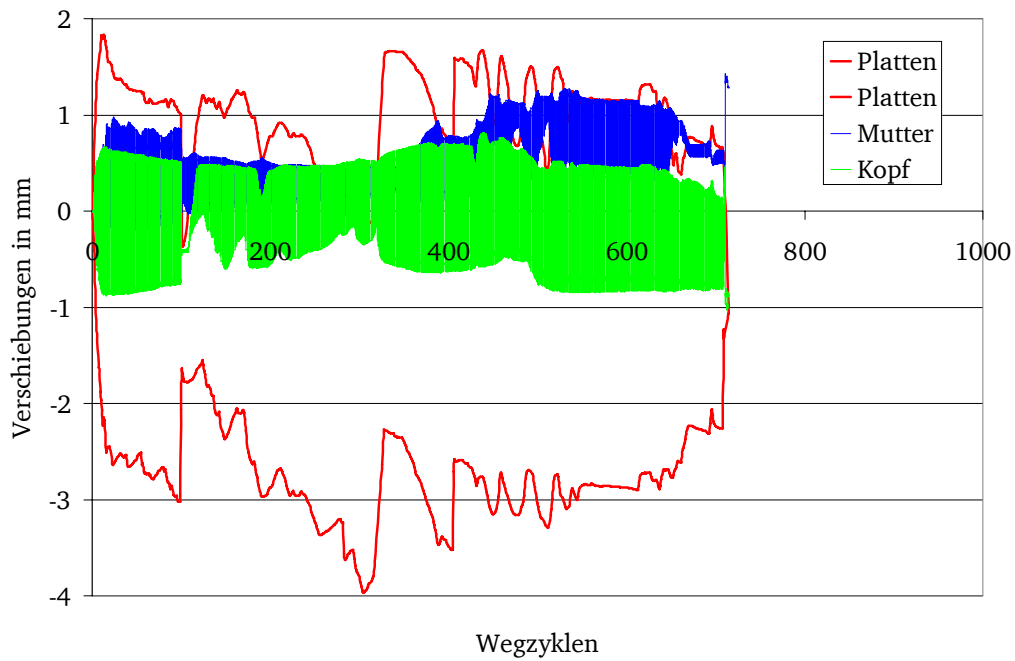


Bild 81: Verschiebungen Versuch 30-2

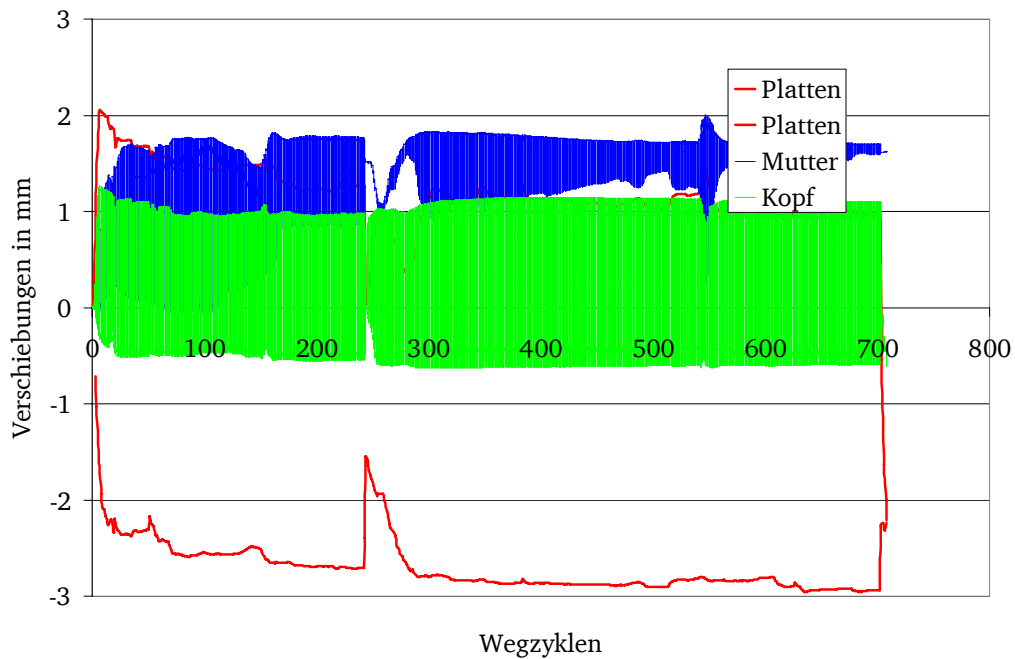


Bild 82: Verschiebungen Versuch 30-3

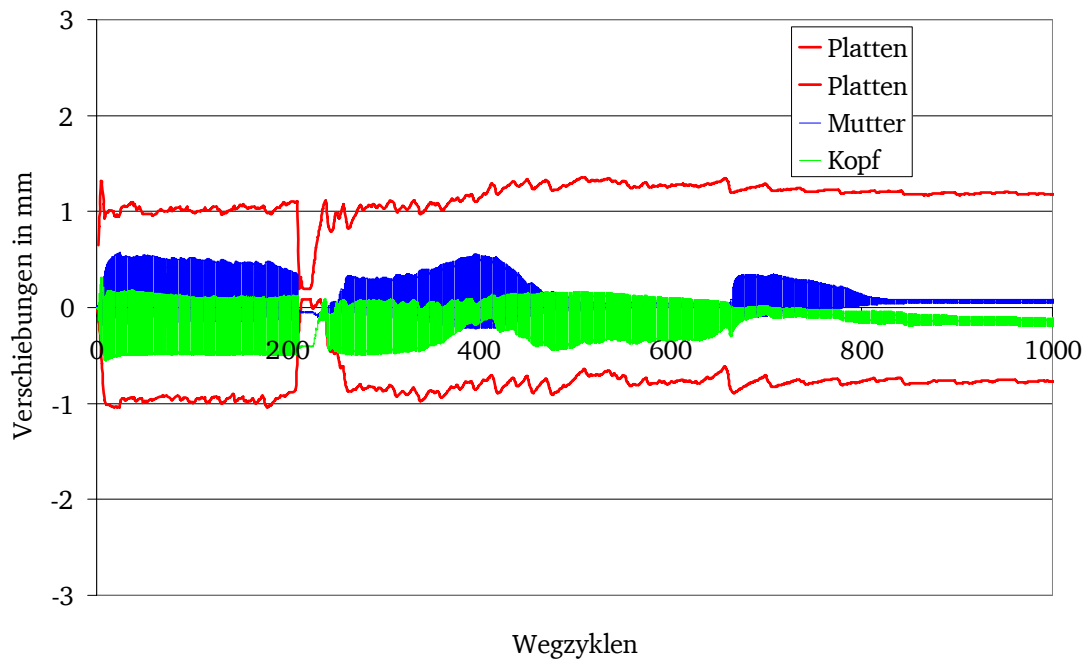


Bild 83: Verschiebungen Versuch 31-1

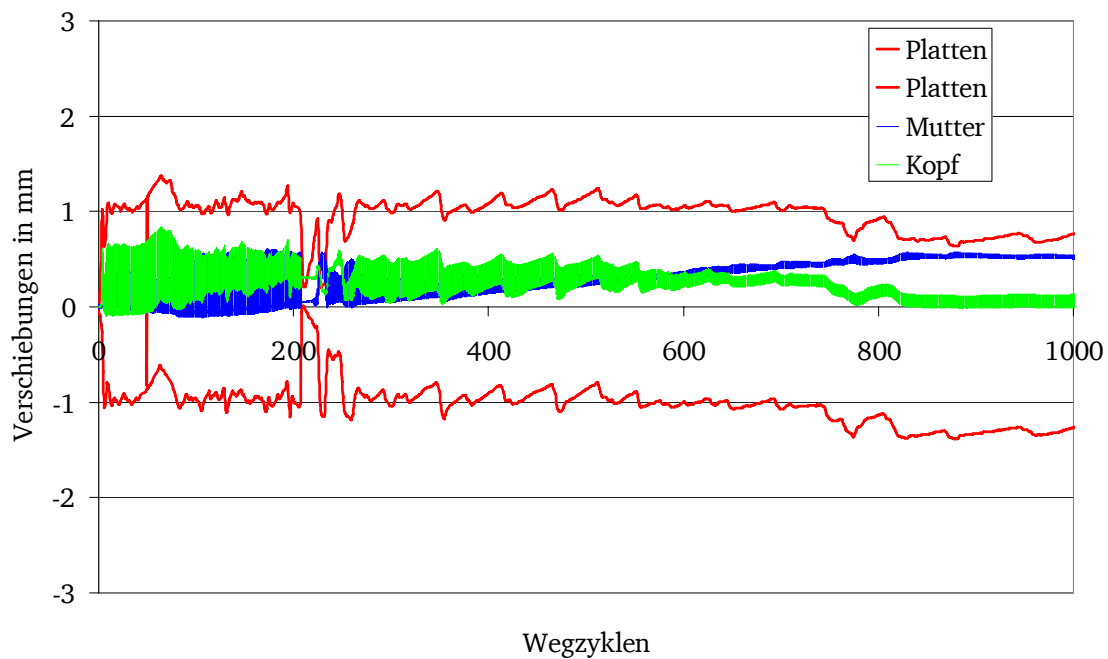


Bild 84: Verschiebungen Versuch 31-2

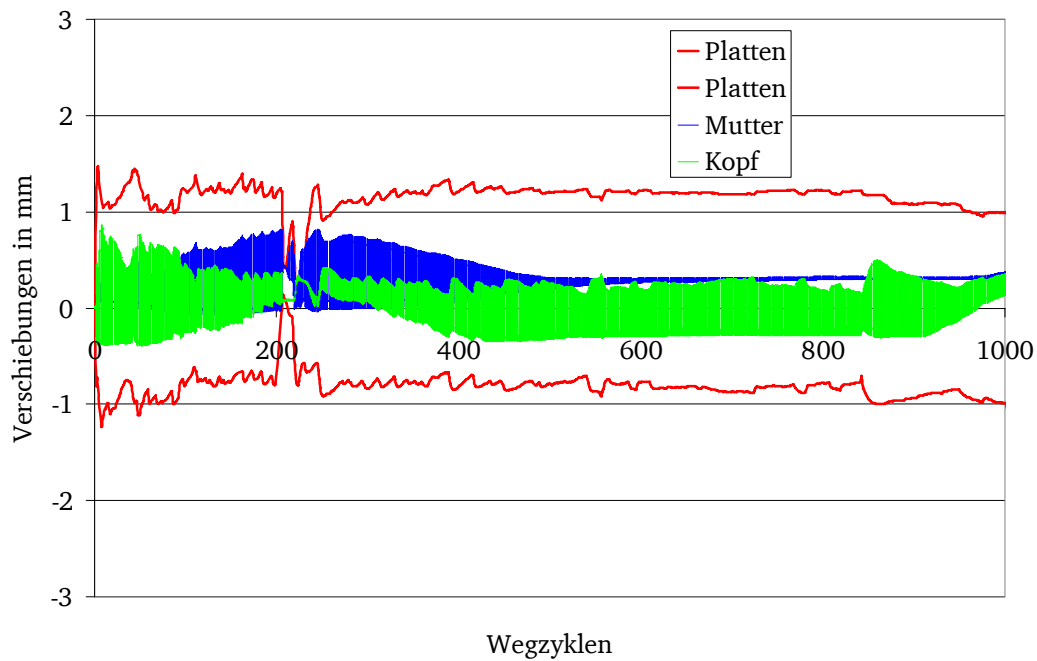


Bild 85: Verschiebungen Versuch 31-3

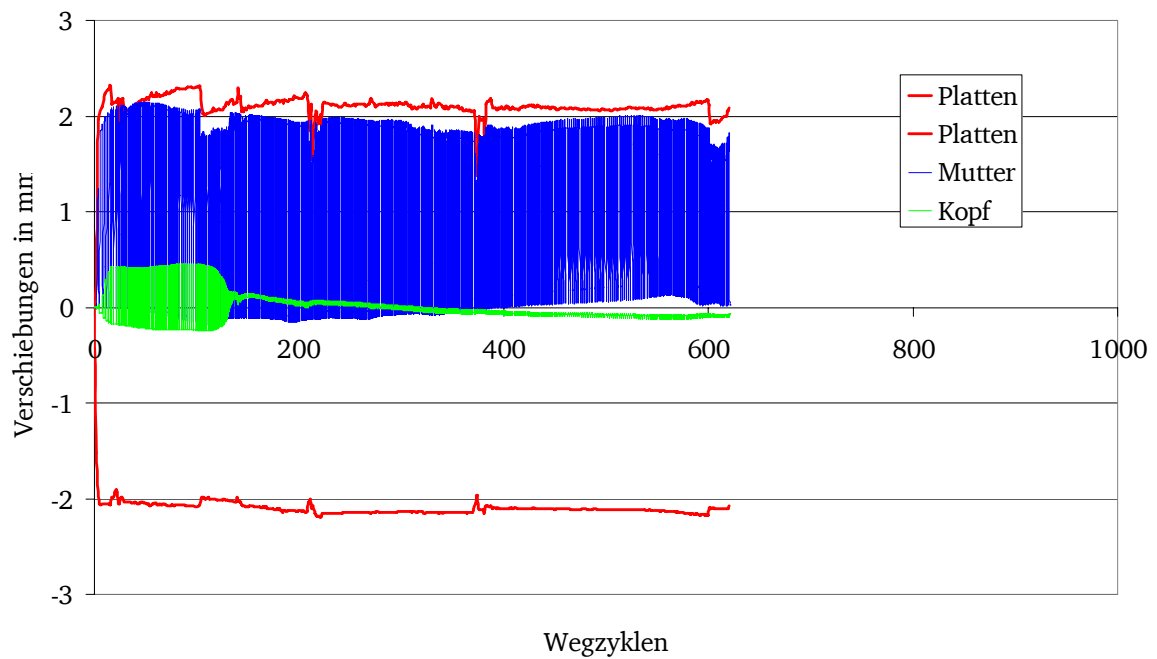


Bild 86: Verschiebungen Versuch 32-1

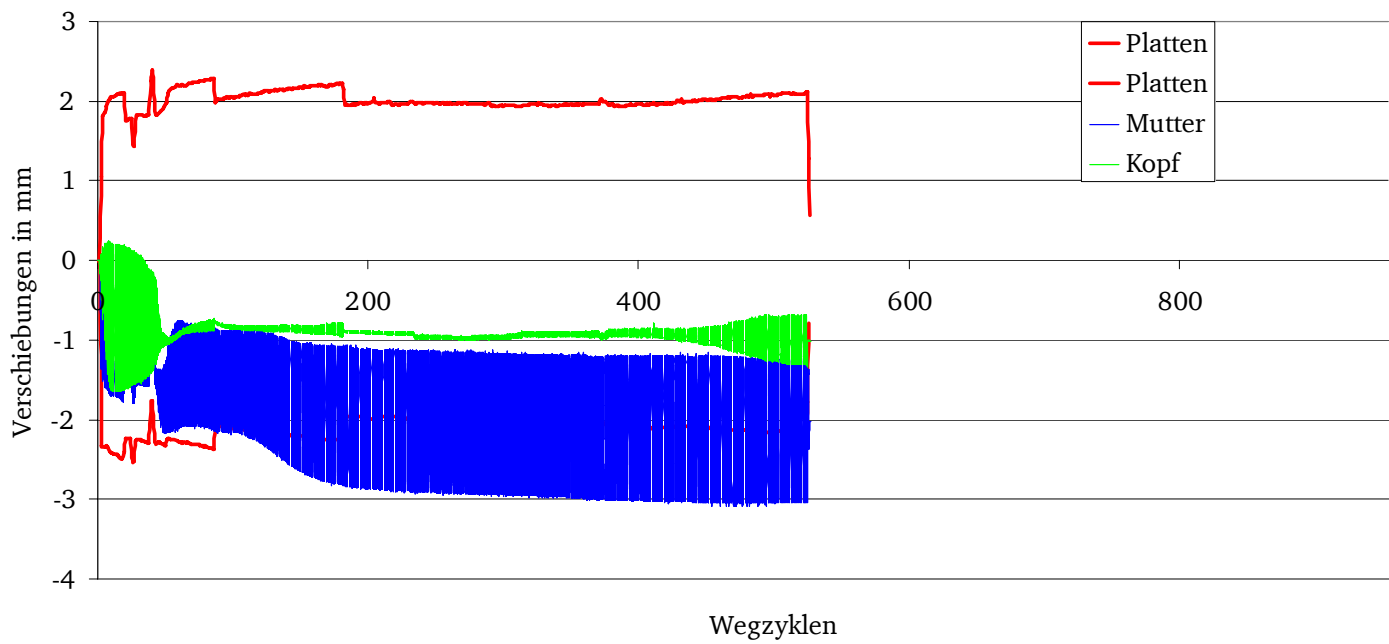


Bild 87: Verschiebungen Versuch 32-2

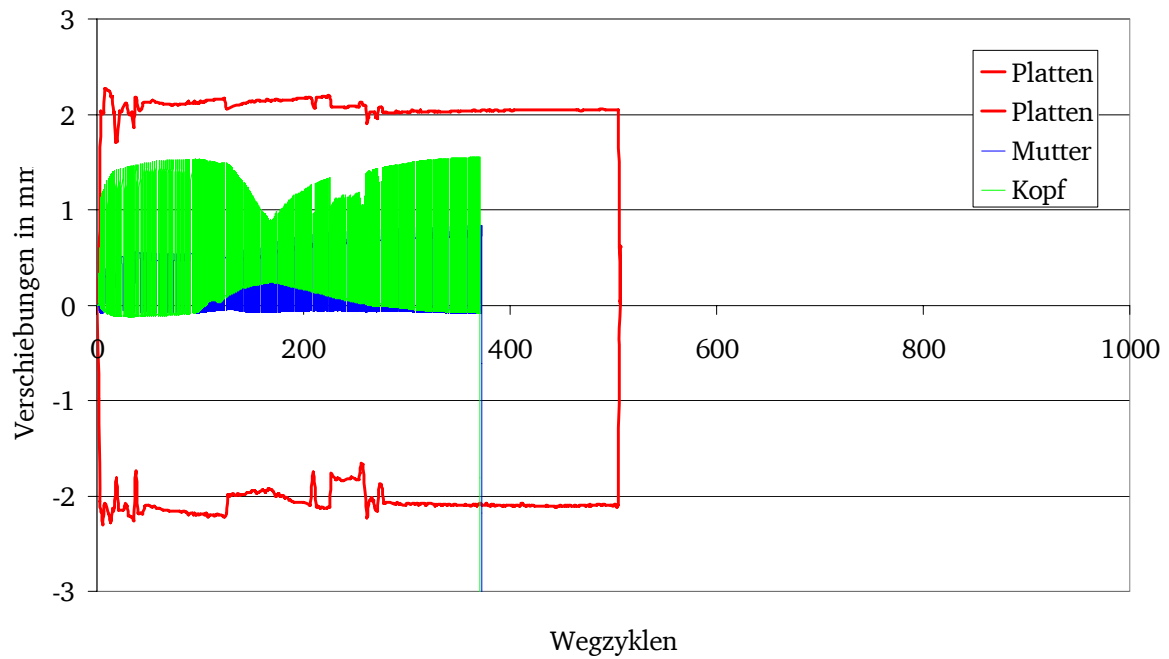


Bild 88: Verschiebungen Versuch 32-3

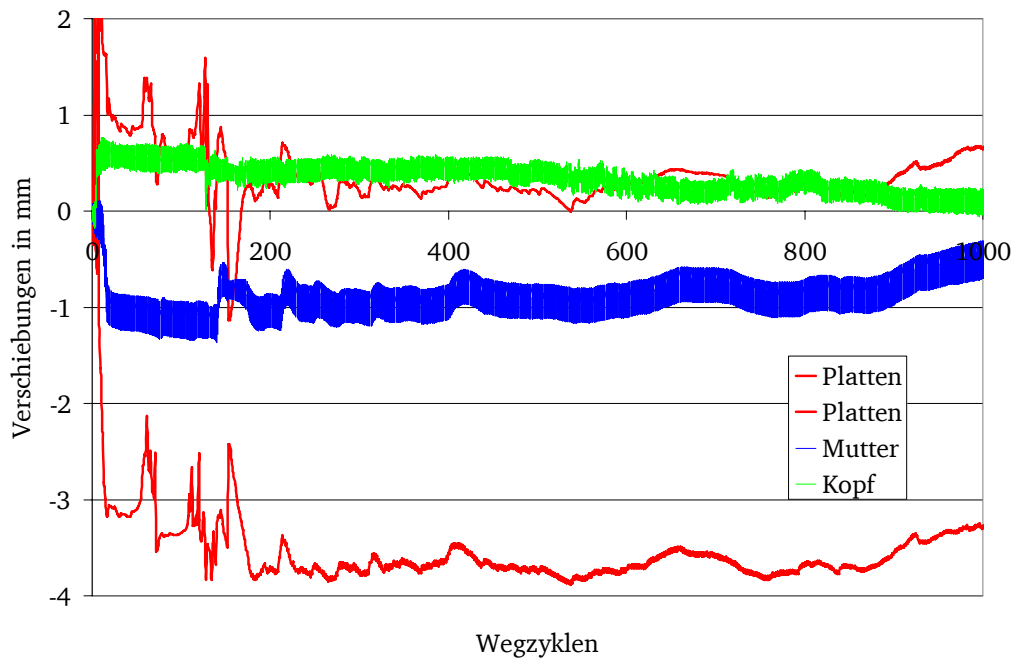


Bild 89: Verschiebungen Versuch 33-1n

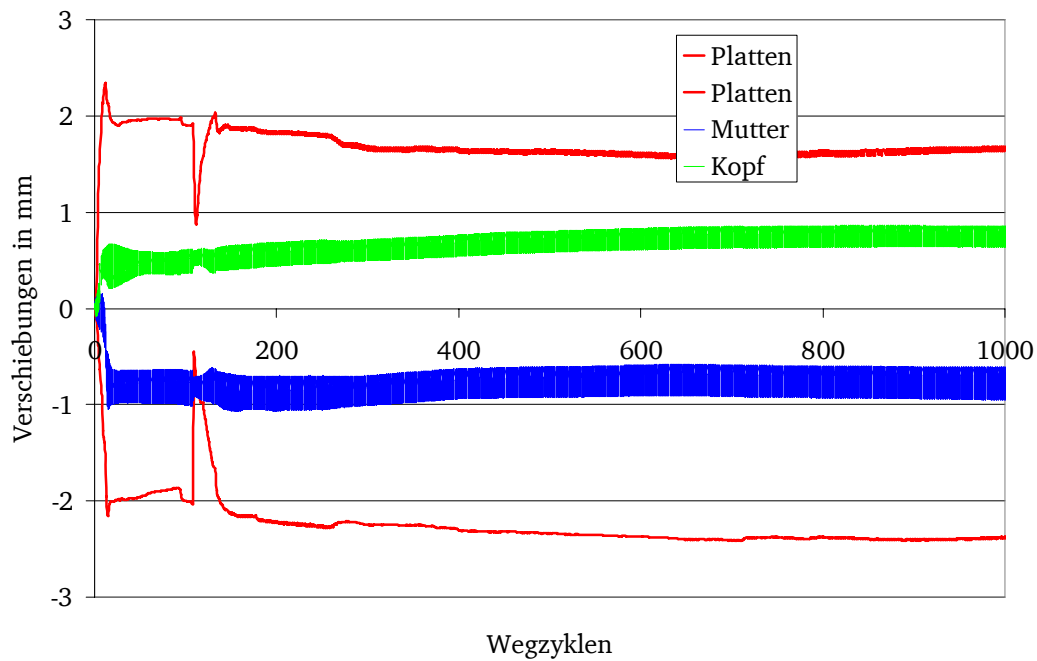


Bild 90: Verschiebungen Versuch 33-2n

## Anhang C

Im Anhang C sind die Systemskizzen der Versuche aufgeführt. Die Skizzen sind nicht maßstäblich.

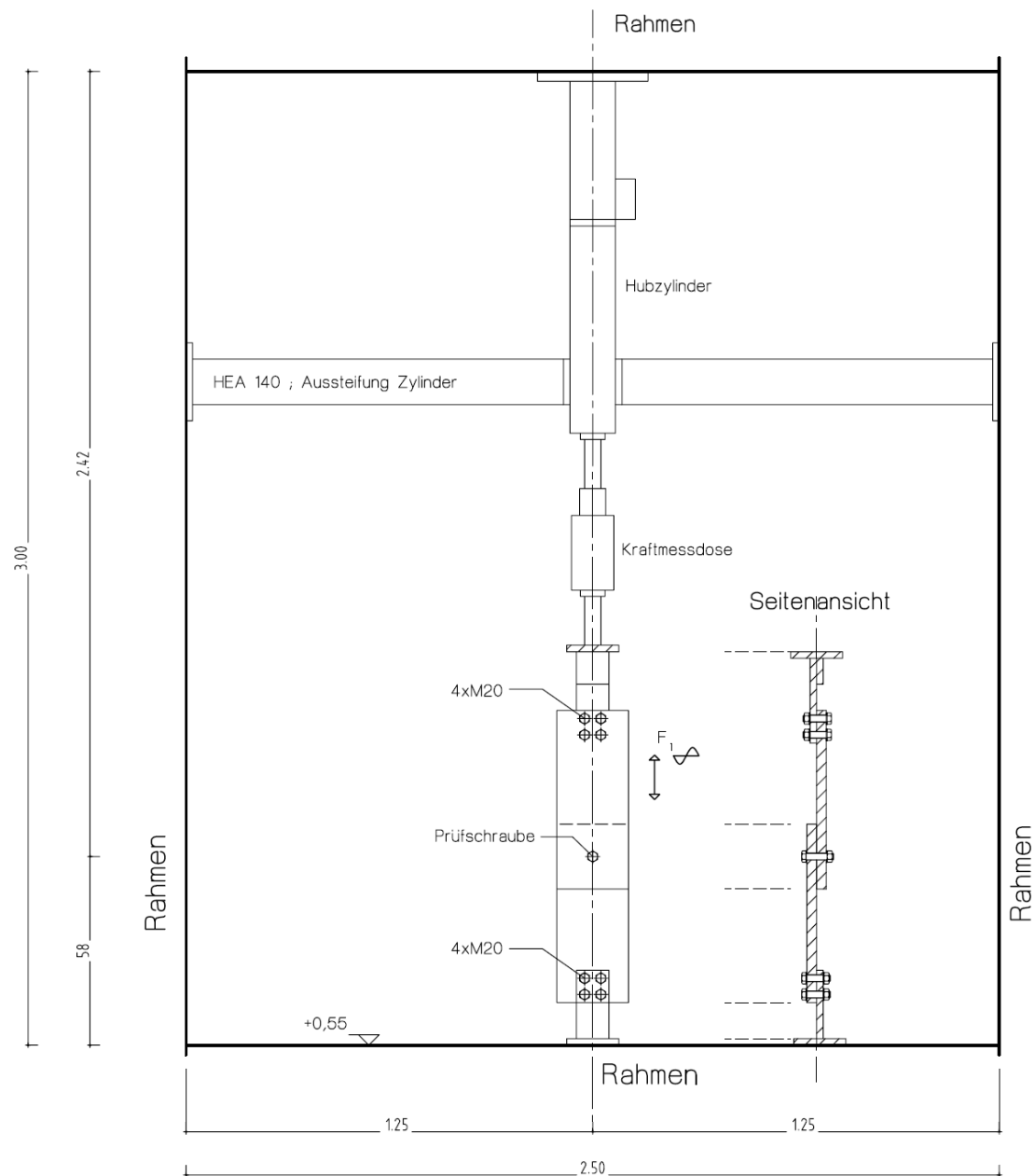
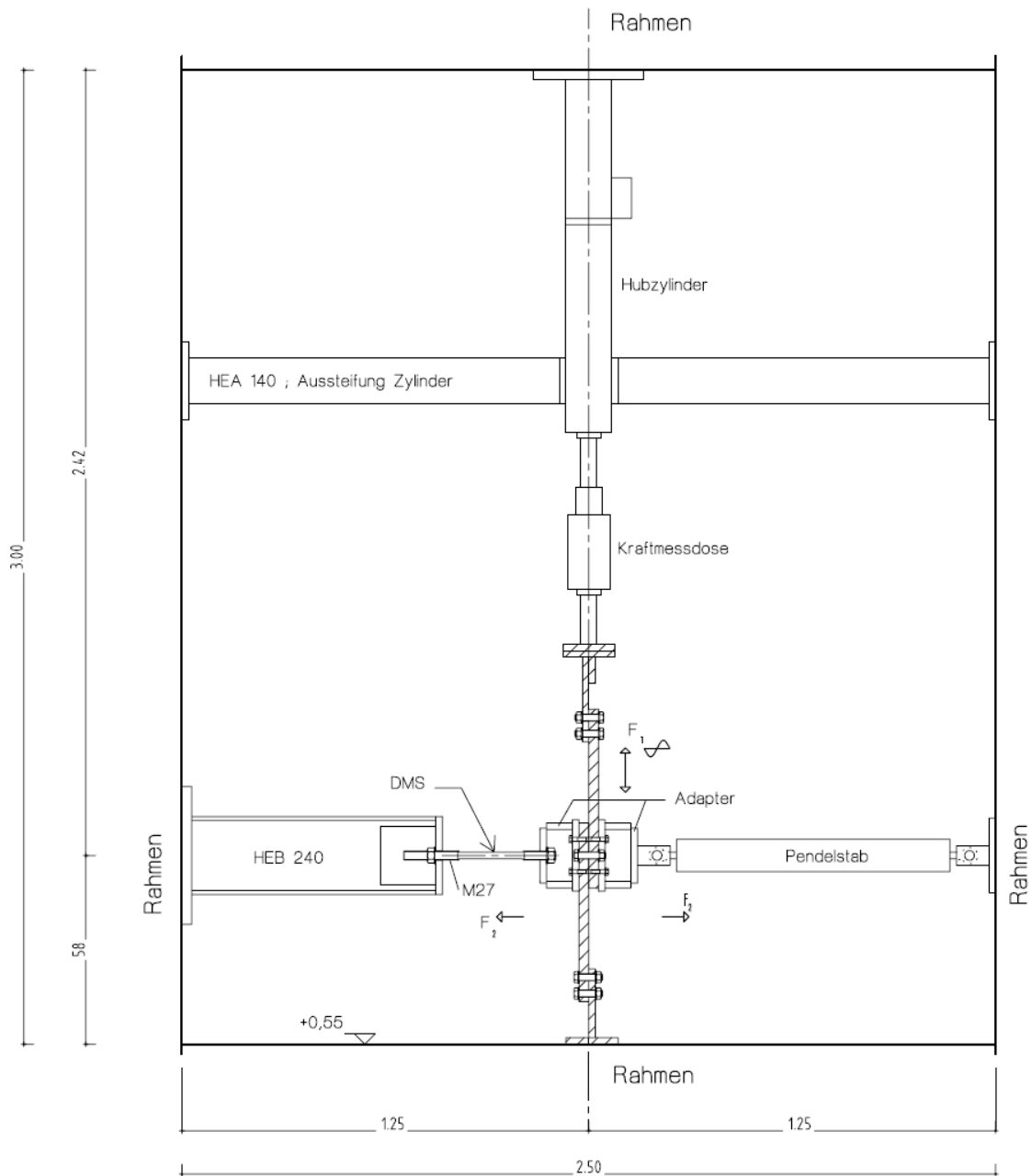
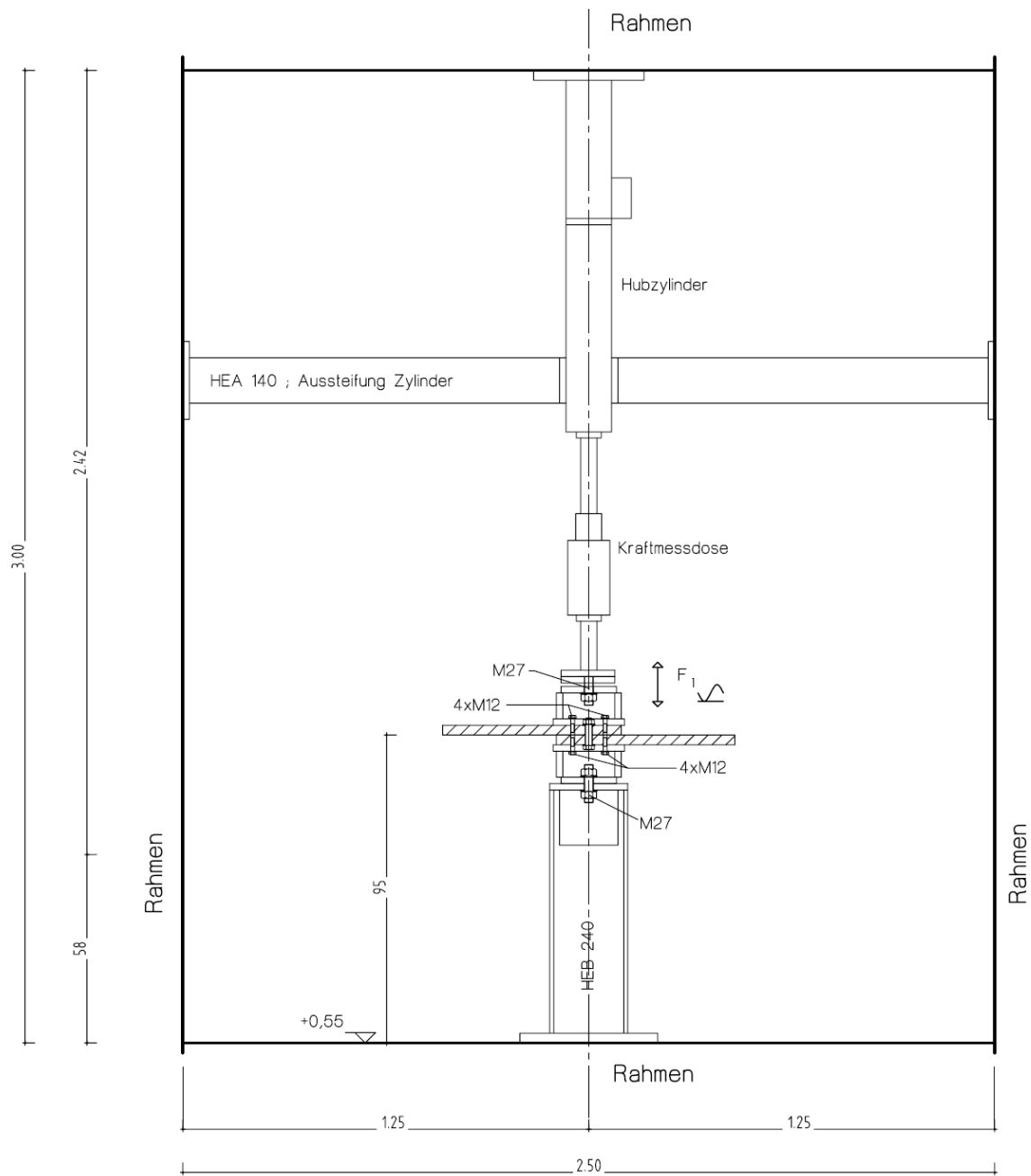


Bild 1: Systemskizze: zyklische Querbelastung (I)



**Bild 2: Systemskizze: Versuchsaufbau zusätzliche Axialkraft (II)**



**Bild 3: Systemskizze: Versuchsaufbau zyklischer Zugversuch (III)**

## DAST-Richtlinien

Stand: August 2016

Nr.	Titel		€
001	Richtlinien für Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (2/70)	überholt durch Zulassungsregelung	
002	Vorläufige Empfehlung zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten (1/60)	ersetzt durch 009	
003	Vorläufige Richtlinie für HV-Verbindungen (1963)	ersetzt durch 010	
004	Vorläufige Empfehlungen für die Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im Stahlbau (5/62)	überholt ersetzt durch Norm-Regelung	
005	Ergänzung zu der vorläufigen Richtlinie für HV-Verbindungen für den Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (3/67)	ersetzt durch 010	
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (1/80)	überholt durch 12/08	
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (12/08)	gültig	20,--
007	Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle (5/93)	gültig	23,--
008	Richtlinien zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau (3/73)	überholt	
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/05)	überholt durch 05/08	
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/08)	gültig	20,--
010	Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau (6/76)	überholt	
011	Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm <sup>2</sup> - Anwendung für Stahlbauten (2/88)	nur noch als Hintergrundliteratur	(18,--)
012	Beulsicherheitsnachweise für Platten zusammen mit Kommentar zur DAST-Richtlinie 012 - , DIN Grundlagen-Erläuterungen-Beispiele (10/78)	überholt	(43,--)

<b>Nr.</b>	<b>Titel</b>		<b>€</b>
013	Beulsicherheitsnachweise für Schalen (7/80)	überholt	
014	Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl (1/81)	gültig	17,50
015	Träger mit schlanken Stegen (7/90), DIN	nur noch als Hintergrundliteratur	(33,50)
016	Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen (2/92)	nur noch als Hintergrundliteratur	(37,--)
017	Beulsicherheitsnachweise für Schalen - spezielle Fälle (Entwurf 10/92)	überholt	(26,50)
018	Hammerschrauben (11/01)	gültig	10,--
019	Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (11/01)	gültig	18,--
020	Bemessung schlanker stählerner windbelasteter Kreiszyinderschalen (05/08)	gültig	25,--
021	Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 64 entsprechend DIN 6914, DIN 6915, DIN 6916 (08/06)	überholt durch 09/13	
021	Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6 (09/13)	gültig	20,--
022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen (08/09)	überholt durch (06/16)	(20,--)
022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen / Hot-dip-zinc-coating of load-bearing steel components (06/16)	gültig	20,--
023	Langlochverbindungen mit Schrauben	gültig	10,--
103	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1993 Teil 1-1, (11/93)	überholt	(13,50)
104	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1994 Teil 1-1, (2/94)	überholt	(11,50)

## Forschungsberichte

Nr.	Titel	€
4/1997	10. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
1/1999	Tragverhalten von Dächern mit Rippen- oder Rippenrostgespärre	23,--
2/1999	Trägerverbund im Industriebau unter nicht ruhender Belastung bei Verwendung von Profilblechen	23,--
3/1999	Ausnutzung der Tragfähigkeit bei konzentrierter Normalkrafteinleitung	23,--
4/1999	11. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
5/1999	Zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Stahlträger mit schlanken Stegen	23,--
1/2000	Ermüdung von Beleuchtungs- und Signalmasten durch den böigen Wind	43,50
2/2000	12. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
3/2000	Flachdecken mit integrierten Stahlträgern	23,--
4/2000	Dimensionierung und Nachweis von instabilitätsgefährdeten gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt (rechnerische und experimentelle Untersuchungen)	23,--
5/2000	Plastische Bemessung von Stirnplatten-Anschlüssen mit 4 Schrauben in einer Reihe	23,--
1/2001	Stützen mit dünnwandigen Querschnittsteilen (im Bereich geringer Schlankheiten)	32,--
2/2001	Optimale Ausnutzung von Verbund-Durchlaufträgern unter besonderer Berücksichtigung nachgiebiger, teiltragfähiger Verbindungen	32,--
3/2001	Bemessung hallenbautypischer Verbindungen	35,--
4/2001	Verformungsverhalten der Komponenten von wirtschaftlichen steifenlosen Anschlusskonstruktionen für die Anwendung plastischer Bemessungskonzepte im Stahlbau	32,--
5/2001	Anziehen von 8.8-Schrauben	20,50
1/2002	Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau	39,--
1/2002	Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau	39,--

Nr.	Titel	€
1/2002	Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau	39,--
2/2002	Kontaktstöße mit Gurtlaschen	32,--
1/2003	14. DAST-Forschungskolloquium	20,--
2/2003	Experimentelle und analytische Untersuchungen an neuartigen Glas-Stahl-Verbindungen im Hinblick auf zukünftige Einsatzgebiete und Bemessungskonzepte	42,--
3/2003	Entwicklung eines Verfahrens zur Konformitätsprüfung der Produktschnittstelle Stahlbau	25,--
4/2003	Wirtschaftliche Aussteifung von Stahlkonstruktionen mit Glas zur Schubübertragung und zur Erhöhung der Filigranität der Konstruktion	48,--
1/2004	Ankerplatten und Einbaudetails zur Kraftübertragung im Stahlbau	58,--
2/2004	15. DAST-Forschungskolloquium	20,--
1/2005	Entwicklung und Anwendung von Planungssoftware zur brandschutztechnischen Optimierung von Stahlgeschossbauten	95,--
2/2005	Entwicklung von Abreißverbindungen von Stahlkonstruktionen an Brandwänden	42,80
3/2005	Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger	45,--
4/2005	Bemessung stabilitätsgefährdeter, gevouteter Kragträger mit T-förmigen Querschnitt und Stegausschnitten aus ferritischem Stahl und gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt aus austenitischen nichtrostenden Stählen (Edelstahl Rostfrei)	35,--
5/2005	Korrelationsbedingter Flächeneffekt der Windersatzlasten und die Auswirkung auf die Tragwerksreaktionen	45,--
6/2005	Ermüdungsverhalten von Betondübeln	35,--
1/2006	16. DAST-Kolloquium	30,--
2/2006	Realitätsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit beul- und biegedrillknick-Gefährdeter dünnwandiger Stahlquerschnitte	60,--
3/2006	Einsatz überlanger Schrauben zur Verbundsicherung bei Verbundträgern aus Normal- und Leichtbeton	60,--
4/2006	Werkstoffwahl im Stahlbrückenbau	99,--

Nr.	Titel	€
1/2007	Abgrenzung des Anwendungsbereiches von Dächern nach DIN 18234	21,--
2/2007	Stahl-Glas-Verbindungen im Hinblick auf die Normung	109,--
3/2007	Einsatz von hochfesten Stählen und Betonen bei Hohlprofil-Verbundstützen	35,--
4/2007	Feststellung zulässiger Restspalte beim Schweißen	89,--
5/2007	Kranbahnträger – Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitungen	80,--
1/2008	Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau	80,--
2/2008	Duktilitätskriterien für Typisierte Stirnplattenverbindungen	50,--
1/2009	Effiziente Nachweisführung von biegeknickgefährdeten, dünnwandigen Stahlquerschnitten	80,--
3/2009	Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-8:2003	80,--
1/2010	Tragende Scheiben-Elemente aus Stahl-Glas-Verbund	35,--
2/2010	Untersuchung des Einflusses konstruktiver Maßnahmen bezüglich der Sicherungseigenschaften gegen Lockern und Losdrehen von planmäßig vorgespannten HV-Schraubenverbindungen unter zyklischer Beanspruchung	50,--
4/2010	Gelenkige Sekundärträgeranschlüsse mit langen Fahnenblechen im Verbundbau	80,--
2/2015	Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile	80,--
3/2015	Dauerhaftigkeit und Dimensionierung des Randverbundes von Mehrscheibenisolierverglas in Abhängigkeit der Klimalast bei Zweifach- und Dreifachisolierverglas - DuraSeal	60,--

Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt

Vertrieb:

Stahlbau Verlags- und Service GmbH,

Postfach 10 51 45, D-40042 Düsseldorf

Tel.: 0211/67078-01 - Fax: 0211/67078-21

Forschungsberichte 290118

e-mail: [contact@deutscherstahlbau.de](mailto:contact@deutscherstahlbau.de)

Internet: [www.deutscherstahlbau.de](http://www.deutscherstahlbau.de)

## Berichte von 1973 - 2004

Titel	Berichtsheft / Autor	Erläuterungen
<p><b>Abschlußberichte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Versuche zur Kippsicherheit von durchlaufenden Pfetten mit leichter Dacheindeckung</li> <li>• Traglastversuch an durchlaufenden U-Pfetten mit Aluminium-Trapezblechen als Dacheindeckung</li> <li>• Traglastversuch an durchlaufenden Pfetten mit Leichtbetonplatten als Dacheindeckung</li> <li>• Das Stabilitätsproblem des in Höhe des oberen Flansches wirklichkeitsnah belasteten I-Trägers</li> <li>• Traglastversuche im überkritischen Bereich zur Entwicklung eines wirklichkeitsnäheren Berechnungsverfahrens für Leichtmetall-Vollwandträger</li> <li>• Versuche zur Feststellung des Einflusses verschiedener Zwischenanstriche auf den Berührungsfächen von Nietverbindungen aus St 52</li> <li>• Regelan schlüsse im Stahlhochbau - Teil I: Traglastversuche an durch Querkraft beanspruchte Winkelanschlüsse mit rohen Schrauben</li> <li>• Einfluß der exzentrischen Lage von Wendeln auf die Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln</li> <li>• Dauerversuche mit einseitig geschweißter Stumpfnah in V-Form auf Keramik-Unterlage</li> <li>• Dauerfestigkeitsversuche mit stumpfgestossenen, in Normalgüte CO<sub>2</sub>-geschweißten Stäben</li> <li>• Statische Versuche mit Verbindungen von Aluminium-Konstruktionen</li> </ul>	<p>1/1973</p> <p>Peilkan</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Fischer</p> <p>Steinhardt</p> <p>Hoffmann</p> <p>Oxford</p> <p>Roik / Lindner</p> <p>Hoffmann</p> <p>Hoffmann</p> <p>Seinhardt / Valtinat</p>	

<p><b>Abschlussberichte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dauerfestigkeitsversuche mit brenngeschnittenen Proben aus St 52-3</li> <li>• Stabilitätsverhalten gedrückter Gurte von Blechträgern</li> <li>• Traglasten von auf Biegung und Torsion beanspruchten Stäben unter Berücksichtigung des plastischen Werkstoffverhaltens</li> <li>• Untersuchung der Tragfähigkeit von Stahlkonstruktionen mit ebenen, scheibenartig beanspruchten Blechen mittels wirklichkeitsnaher Großversuche (Plattenbeulprogramm)</li> <li>• Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgern       <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherheitsbetrachtung beim Beulen von Kastenträgern</li> <li>• Kurzreferate und Inhaltsangaben zu den Vorträgen der Fachsitzung I, Deutscher Stahlbautag 1974</li> <li>• Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland</li> <li>• Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien</li> <li>• Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten</li> <li>• Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger</li> <li>• Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“</li> </ul> </li> <li>• Ermittlung des Reibungswertes <math>\mu</math> zwischen Betonfertigteilen und Stahlunterlage</li> <li>• Zur Sprödbruchsicherheit von verzinkten und unverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern</li> <li>• Abwüργeversuche an feuerverzinkten und schwarzen HV-Schrauben</li> <li>• Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaues mit vorwiegend ruhender Belastung</li> <li>• Tragverhalten von Schließringbolzenverbindungen in schwingend beanspruchten Stahlkonstruktionen</li> <li>• Biegesteife HV-Kopfplattenverbindungen (Regelanschlüsse im Stahlhochbau Teil I)</li> <li>• Verbindungen hochfester Stähle mit hochfesten Schrauben</li> <li>• Dauerfestigkeit von querbeanspruchten Stumpfnähten mit kreuzenden Strichraupen</li> <li>• Zusammenwirken von Stumpfnähten mit HV-Schrauben und Nieten bei ruhender und bei Dauerbelastung</li> </ul>	<p><b>2/1975</b></p> <p>Hoffmann Barbré Roik / Lindner</p> <p>Barbré / Jungbluth / Roik / Scheer / Steinhardt</p> <p>Dubas</p> <p>Roik Godfrey</p> <p>Massonnet</p> <p>Steinhardt Scheer</p> <p>Roik</p> <p>Martin</p> <p>Steinhardt / Valtinat Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Hoffmann</p> <p>Aurnhammer / Hoffmann</p>
--	--

<p>Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgerbrücken</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung</li> <li>• Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland</li> <li>• Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien</li> <li>• Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten</li> <li>• Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger</li> <li>• Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“</li> </ul>	<p><b>3/1975,</b></p> <p>Hoffmann Roik Godfrey</p> <p>Massonet</p> <p>Steinhardt Nölke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Hamburg 1974 Leitung: Roik</p>
<p>Beiträge zum Tragverhalten und zur Sicherheit von Stahlkonstruktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorwort und Einführung</li> <li>• Zur Berechnung und Konstruktion druckbeanspruchter Schalen aus Stahl</li> <li>• Zum Stabilitätsverhalten von Trägern im Stahlhochbau</li> <li>• Zum Tragverhalten und Einsatz von Trapezprofilblechscheiben</li> <li>• Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau</li> <li>• Grundgedanken zur Bemessung stählerner Eisenbahnbrücken auf Betriebsfestigkeit vor wahrscheinlichkeitstheoretischem Hintergrund</li> </ul> <p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p><b>4/1977</b></p> <p>Jungbluth Bornscheuer</p> <p>Oxford Fischer Petersen</p> <p>Siebke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung II des Deutschen Stahlbautages Stuttgart 1976</p>
<p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p><b>5/1977</b></p> <p>Jungbluth, Bode</p>	<p>Berichte aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr- Universität Bochum, und dem Institut für Statik und Stahlbau, Technische Hochschule Darmstadt</p>

Beiträge zur Berechnung und Ausführung von Stahlkonstruktionen	<b>6/1979</b> Scheer, Schumann, Ahrens, Kröplin, Schmidt, Peil, Beyer, Grassl, Langhoff, Rabe, Hering, Koch, Kanning, Koep, Born, Maier, Twelmeier, Griebenow, Harbord, Duddeck, Vollstedt	Vorträge zum 70. Geburtstag von Prof. Barbré 25.8.1977
Beiträge zur Normung Hochfeste Baustähle und Stabilität von Stahlbauteilen	<b>7/1979</b> Jungbluth, Degenkolbe, Haneke, Schlüter, Seeger, Minner, Schönherr, Vogel, Scheer,	Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages in Düsseldorf 1978
Stahlprofilblech-Beton-Verbundplatten	<b>8/1979</b> Jungbluth, Schäfer, Gräfe	
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten Klärung des Tragverhaltens durch Bauteilversuche	<b>9/1980</b> Scheer	Sonderdruck Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Berlin 1980
Biegedrillknicken - Erläuterungen, Versuche, Beispiele	<b>10/1980</b> Lindner, Gietzelt	
Kommentar zu DIN 18 800, Teil 2 (Gelbdruck) - Stabilitätsfälle im Stahlbau - Knicken von Stäben und Stabwerken	<b>11/1981</b> Vogel, Lindner	
Plattenbeulen - 8 Großversuche mit längs- und querausgesteiften Blechfeldern	<b>12/1982</b> Roik, Kindmann, Schaumann	
Beiträge zu Berechnung und Konstruktion <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachte Stabilitätsnachweise von Stäben und Systemen</li> <li>• Aspekte der Gebrauchstüchtigkeit von Stahlbauten</li> <li>• Hohe Bauwerke aus Stahl - Statische und konstruktive Lösungen</li> <li>• Zukunftsaufgaben des Stahlbaues - Aufgaben für Forschung und Entwicklung</li> </ul>	<b>13/1984</b>  Roik Sedlacek Scheer Bärsch	
Bedarfslasten unversteifter Stahlbleche unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Eigenspannungen	<b>14/1985</b> Jungbluth, Friemann, Kubsch	

Beiträge zu Berechnung und Konstruktion	<b>15/1986</b> Lindner, Valtinat, Baehre, Krämer	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 1986 Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>16/1988</b> Baehre, Bode, Lindner, Vogel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Karlsruhe 1988
Bericht aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>17/1990</b> Nather, Hosser, Petersen, Degenkolbe, Kalla, Schönherr	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Nürnberg 1990
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>18/1992</b> Scheer, Schmidt, Sedlacek, Lietz, Dahl, Mang, Brandes, Valtinat	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 1992
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>19/1994</b> Sedlacek, Blank, Güsgen, Hanswille, Ehm, Fischer, Eggert	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bonn 1994
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>20/1996</b> Bossenmayer, Schmidt, Peil, Hubo, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bremen 1996
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>Dokumentation 651</b> Bossenmayer, Hanswille, Graße, Katzung, Schaumann, Bode, Valtinat, Haydrich, Grotmann, Pasternak, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Leipzig 1998
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>Dokumentation 654</b> Bossenmayer, Lindner, Schleich, Böhme, Bschorr, Nentwig, Cierpinski, Huber, Kuhlmann, Kühnemund, Günther, Sedlacek Laufs, Wellershof, Bohmann, Kathage	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Stuttgart 2000

Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>Dokumentation 657</b> Bohmann, Heinemeyer, Höhler, Keitel, Kühn, Lange, Langenberg, Lindner, Mangerig, Müller, Sedlacek, Schulz, Stötzel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 2002
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	<b>Tagungsdokumentation zur          Fachtagung anlässlich des          Deutschen Stahlbautages Berlin          2004</b> Fontana, Hanswille, Keitel, Peil, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 2004

dast/berichte/beran14

## Berichte von 1915 - 1969

Titel	Jahr	
Der Einfluß der Nietlöcher auf die Längenänderung von Zugstäben und die Spannungsverteilung in ihnen	Ausgabe A, Heft 1, 1915 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Zur Einführung - Bisherige Versuche	Ausgabe B, Heft 1, 1915 Kögler	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Versuche zur Prüfung und Abnahme der 3000 t-Maschine	Ausgabe A, Heft 2, 1920 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 2	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche mit Anschlüssen steifer Stäbe	Ausgabe A, Heft 3, 1921 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 3	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
	Ausgabe A, Heft 4	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche zur Ermittlung der Knickspannungen für verschiedene Baustähle	Ausgabe B, Heft 4, 1930 Rein	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 5	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Dauerversuche mit Nietverbindungen	Ausgabe B, Heft 5, 1935 Graf	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 6	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen über die Knickfestigkeit von gestoßenen Stützen mit plangefrästen Stoßflächen und nur teilweiser Stoßdeckung (Kontaktstöße) bei mittlerer und außermittiger Belastung	Ausgabe B, Heft 6, 1936 Bierett, Grüning	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 7	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen	Ausgabe B, Heft 7, 1937 Bierett	Berichte des DAST

	Ausgabe A, Heft 8	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Längsriegeln in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern	Ausgabe B, Heft 8, 1937 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 9	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Aus Untersuchungen mit Leichtfahrbahndecken zu Straßenbrücken	Ausgabe B, Heft 9, 1938 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 10	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Baustellengröße geschweißter Brückenträger	Ausgabe B, Heft 10, 1940 Bierett	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 11	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweißten Brücken	Ausgabe B, Heft 11, 1940 Graf	Berichte des DAST
	Heft 12, 1941	Berichte des DAST
Versuche mit Nietverbindungen	Heft 13, Albers	Berichte des DAST
Einfluß der Nahtform und der Schweißausführung auf die Querverspannung beim Schweißen unter Einspannung		
Versuche über das Verhalten von geschweißten Trägern unter oftmals wiederholter Belastung	Heft 14, 1942 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit geschweißten Trägern zur Beurteilung der Eignung der verwendeten Werkstoffe und der Art der Herstellung der Träger. Prüfung der Werkstoffe mit dem Nutzwinkelbiegeversuche und mit dem Kerbschlagbiegeversuch	Heft 15, 1943 Graf	Berichte des DAST
	Heft 16, 1951 Graf	Berichte des DAST
Versuche über die Widerstandsfähigkeit von geschweißten Querträgeranschlüssen bei oftmals wiederholter Biegebelastung	Heft 17, 1952 Graf / Munzinger	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	1. Teil, Heft 18, 1954 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
	Heft 19, 1956 Graf / Brenner	Berichte des DAST
Versuche an Verbundträgern	Heft 20, 1957 Kuntze	Berichte des DAST
Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau		

Thermodynamik des Sprödbrechens und ihre Anwendung im Stahlbau	2. Teil, Heft 20a, 1959 Kuntze	Berichte des DAST
Der Feuerschutz im Stahlhochbau insbesondere von Stahlstützen	Heft 21, 1959 Boué	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben	II. Teil, Heft 22, 1959 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Untersuchungen zur Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im allgemeinen Stahlbau	1. Teil, Heft 23, 1960, Bierett, Steinhardt	Berichte des DAST
HV-verschraubte Kopplattenverbindungen bei biegefesten Stabwerken	Vorabdruck aus Heft 24 1961 Steinhardt, Schlaginhaufen	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	III. Teil, Heft 24, 1962 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	IV. Teil, Heft 25, 1969 Steinhardt, Möhler, Valtinat	Berichte des DAST

DAST/Berichte/Anlage für Berichte 1915-1969

